

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP BUS/CIVITAS

Pedro Miguel Vasques Eusébio da Costa Almeida

Dissertação/Relatório de Projeto realizada(o) no âmbito do

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Major Projeto e Construções Mecânicas

Orientador: Prof. Dr. António Torres Marques

Co-orientador: Eng. Paulo Neves

21-10-2013

© Pedro Miguel Almeida, 2013

Resumo

A partir do final do século passado, devido ao aumento das preocupações ambientais, de segurança e económicas cada vez mais nas indústrias dos transportes é dada uma maior importância à redução de peso das suas estruturas. Para tal, é cada vez mais usual a substituição das estruturas tradicionalmente realizadas em aço por outras realizadas em materiais compósitos mais leves e que conferem uma maior resistência e rigidez específicas à estrutura.

O trabalho descrito ao longo desta tese pretende demonstrar e validar o uso de novas tecnologias, nomeadamente o uso de materiais compósitos na indústria automóvel.

Objetivamente o que se pretende é conceber e validar um autocarro em que a estrutura é realizada em painéis de sanduiche com um núcleo em espuma de PVC e as peles em fibra de vidro obtidas por enrolamento filamentar a seco sendo posteriormente a pré-forma obtida sujeita ao processo de. Esta estrutura deve apresentar uma maior rigidez e resistência específicas, que a equivalente tradicional em aço, com a consequente redução de peso.

Palavras-chave: Industria dos transportes; Redução de Peso; Materiais Compósitos; Rigidez específica ; Resistência Específica; Sanduiche; PVC; Fibra de Vidro; Enrolamento filamentar; SCRIMP .

Abstract

From the end of last century, due to increasing environmental concerns, and economic security increase in the transport industries, is given greater importance to reduce weight of their structures. Hence, it is becoming more common to replace traditional structures in steel by other in composite materials made lighter and to provide a higher specific strength and rigidity to the structure.

The work described throughout this thesis intends to demonstrate and validate the use of new technologies such as the use of composite materials in the automobile industry.

Objectively, the aim is to design and validate a bus structure that is held in sandwich panels with core in PVC foam and being the skins made in glass fiber obtained by dry filament winding and subsequent SCRIMP. This structure should have a higher specific stiffness and strength than equivalent traditional steel, with a consequent reduction in weight.

Keywords: The transport industry; Weight Reduction; Composite Materials; Specific stiffness; Specific strength; Sandwiches, PVC, Fiberglass, filament winding; scrimp.

Agradecimentos

- Um especial agradecimento ao orientador científico, Professor Doutor António Torres Marques, por me ter dado a oportunidade de trabalhar na área dos materiais compósitos e por toda a colaboração e apoio;
- Agradeço ao Engenheiro Paulo Neves pela ajuda e colaboração no processo de simulação estrutural;
- Agradeço ao Engenheiro Joaquim Oliveira Fonseca, pela colaboração na produção de peças que tornaram o protótipo exequível;
- Agradeço aos Engenheiros Hugo Faria, Nuno Cerqueira e ao técnico João Pedro pelo aconselhamento e ajuda na elaboração dos protótipos;
- Agradeço à Engenheira Célia Novo pelo aconselhamento técnico e disponibilidade.

Lista de Símbolos e Abreviaturas

- FEUP- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
- INEGI- Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial;
- CM- Câmara Municipal;
- UE – União Europeia;
- ISO – International Organization for Standardization;
- DIN - Deutsches Institut für Normung;
- CAD-Computer Aided Design;
- 2D-Duas Dimensões;
- 3D- Três Dimensões;
- PS Poliestireno – “Polystyrene”;
- PU Poliuretano;
- PVC Policloreto de vinil;
- RTM Moldagem por transferência de resina – “Resin Transfer Moulding”;
- VARTM Moldagem em vácuo por transferência de resina – “Vacuum Assisted Resin Transfer Molding”;
- SCRIMP Processo “Seamann” de moldagem de compósito por infusão de resina – “Seeman Composites Resin Infusion Molding Process”;
- MEF-Método dos Elementos Finitos;
- UV- Raios Ultra-violeta;
- N-Numero total de camadas;
- r, θ, z -Sistema de coordenadas cilíndricas;
- x,y,z -Sistema de coordenadas cilíndricas;
- \varnothing -Diâmetro;
- mm - Milímetro;
- m- metro;
- N - Newton;
- KN - Kilo Newton ;
- e - Espessura;
- Σ - Somatório;
- MPa - Mega Pascal;
- GPa- Giga Pascal;
- σ_{ced} - Tensão de cedência;
- E- Módulo de Elasticidade;
- D-diâmetro da peça que se pretende produzir;
- N- número adimensional que define o grau de entrecruzamento;
- L -largura da peça fabricar;
- α - ângulo de enrolamento;
- M- massa em ordem de marcha do veículo;
- G- constante igual 9.81 m/s^2 correspondente á aceleração da gravidade;
- W-largura máxima do veículo;
- H_s - altura do centro de gravidade do veículo com o peso em ordem de marcha em kg;
- H -altura do veículo em metros.

- m - número total de pilares indicado pelo fabricante;
- n - número de pilares situados á frente do centro de gravidade do veículo;
- p - número de pilares situados a traz do centro de gravidade;
- E_i - quantidade de energia que pode ser absorvida pelo montante i da superestrutura;
- E_{iF} - quantidade de energia que pode ser absorvida pelo montante i situado á frente do centro de gravidade do veículo;
- E_{iR} - quantidade de energia que pode ser absorvida pelo montante i situado á traz do centro de gravidade do veículo;
- $d_{máx}$ - maior deformação medida na direção do impacto numa das secções da carroçaria depois de absorvida a energia de impacto correspondente ao que é indicado pelo fabricante;
- d_{min} - menor deformação medida na direção do impacto (no mesmo ponto do espaço entre pilares que para $d_{máx}$) numa das secções da carroçaria depois de absorvida a energia de impacto correspondente ao considerado pelo fabricante;
- l_{iF} - distância do centro de gravidade do veículo ao montante i situado para a frente do centro de gravidade;
- l_{iR} - distância do centro de gravidade do veículo ao montante i situado para a retaguarda do centro de gravidade;
- L_F é a distância do centro de gravidade do veículo à face dianteira do mesmo;
- L_R é a distância do centro de gravidade do veículo à face traseira do mesmo;
- M_x - Momentos em X;
- M_y - Momentos em Y;
- I - Momento de Inércia;
- E - Módulo de elasticidade;
- E_L - Módulo de elasticidade de uma camada, na direção da fibra;
- E_r - Módulo de elasticidade de uma camada, na direção radial;
- E_T - Módulo de elasticidade de uma camada, na direção transversal á fibra;
- E_z - Módulo de elasticidade de uma camada, na direção normal a camada;
- E_θ - Módulo de elasticidade de uma camada, na direção circunferencial;
- FFC- Falha da Fibra a Compressão;
- FFT - Falha da Fibra a Tração;
- FMC - Falha da Matriz a Compressão;
- FMT - Falha da Matriz a Tração;
- FRP Fibre Reinforced Polymer Composites – Compósitos de Matriz Polimérica reforçados por Fibras;
- G_{LT} - Módulo de elasticidade transversal (ou de corte) de cada camada;
- $G_{rz}, G_{\theta z}, G_{Lz}, G_{Tz}$ - Módulo de elasticidade transversal (ou de corte);
- $G_{r\theta}$ - Módulo de elasticidade transversal (ou de corte) associado ao sistema cilíndrico de coordenadas $r-\theta$;
- $G_{\theta r}$ - Módulo de elasticidade transversal (ou de corte) associado ao sistema cilíndrico de coordenadas $\theta-r$;
- L, T, Z - Sistema de coordenadas cartesianas materiais (sistema material ou local);
- m - Valor máximo da expressão do critério de Hashin;
- P - Carga aplicada;
- P_{crit} - Carga critica que provoca rotura segundo o critério de Hashin;
- S - Resistência mecânica ao corte no plano L-T, ou valor admissível da tensão de corte σ_{12} ;
- S_T - Resistência mecânica ao corte interlaminar, ou valor admissível da tensão de corte σ_{23} ;
- X_c - Resistência mecânica das camadas do compósito na direção das fibras, à compressão;
- X_T - Resistência mecânica das camadas do compósito na direção das fibras, à tração

- Y_C -Resistência mecânica das camadas do compósito na direção transversal às fibras, à compressão;
- Y_T -Resistência mecânica das camadas do compósito na direção transversal às fibras, à tração;
- δ - Espessura de cada lâmina;
- ν_{LT} Coeficiente de Poisson de cada camada;
- τ_{LT} Tensão de corte no plano da lâmina, L-T;
- σ_D Tensão de delaminação no elemento curvo;
- σ_{ij} - Componentes de tensão de corte verificada na direção ij. Se índices iguais, tensões normais, se diferentes tensões de corte;
- σ_r - Tensão radial;
- σ_θ -Tensão circunferencial.

ÍNDICES

Índice Geral

I- Introdução

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Lista de Símbolos e Abreviaturas	ix
ÍNDICES.....	xiii
Índice Geral	xiii
Índice de Figuras	xviii
Índice de tabelas	xxvi
1. Objetivo.....	1
2. Introdução.....	3
3. Benefícios Potenciais	5
3.1. Peso	5
3.2. Ligações entre elementos	5
3.3. Corrosão	6
3.4. Segurança Passiva	6
3.5. Manutenção e Reciclagem	6
3.6. Desenvolvimento de novas tecnologias e ensaios	6

II- Pesquisa Bibliográfica

1. O Autocarro [3, 4]	9
1.1. Produtores de autocarros em materiais compósitos\Soluções já desenvolvidas	9

1.1.1.	Projeto FEUP/CIVITAS	10
1.1.2.	North American Bus Industries - CompoBus Metro 45C-2FW	11
1.1.3.	Proterra LLC – EcoRide BE35.....	13
1.1.4.	Mobile Energy Solutions LLC – Hybrid electric bus.....	14
1.1.5.	Projetos ainda em fase de desenvolvimento	15
1.1.5.1.	HCV - Hybrid Commercial Vehicle..... 1.1.5.1. HCV - Hybrid Commercial Vehicle.....	15
1.1.5.2.	Litebus - Modular Lightweight Sandwich Bus Concept.....	16
1.2.	Dados da sinistralidade Rodoviária	17
2.	Materiais compósitos.....	21
2.1	Reforço	21
2.1.1.	Fibra de vidro	22
2.2.	Matriz	24
2.2.1.	<i>Matrizes termoplásticas</i>	24
2.2.2.	Matrizes termoendurecíveis	24
2.2.2.1.	Tipos de Resina.....	25
2.2.2.1 .1.	Polisesteres insaturados.....	25
2.2.2.1 .2.	Viniléster.....	26
2.2.2.1 .3.	Epóxido.....	26
2.3.	Cargas	26
2.4.	Aditivos.....	27
3.	Processos de fabrico	29
3.1.	Moldação por Vácuo	29
3.2.	Moldação por Injecção.....	30
3.2.1.	RTM.....	31
3.2.2.	SRIM (Structural Reaction Injection Molding)	32
3.2.3.	Processo de moldação de compósito por infusão de resina de Seemann (SCRIMP)	32
3.3.	Autoclave.....	33
3.4.	Centrifugação	34
3.5.	Enrolamento filamentar	35
3.5.1.	Considerações de Projeto	37

3.5.2.	Considerações de produção.....	37
3.5.3.	Processo produtivo	38
3.5.3.1.	Seleção do fio de fibra a utilizar.....	38
3.5.3.2	<i>Compactação e cura da resina</i>	38
3.5.3.3.	Design e conceção do mandril	38
3.5.3.4.	Processo de Impregnação	39
3.5.3.5.	Seleção de materiais para o enrolamento filamentar.....	40
3.5.3.6.	Considerações de forma	41
3.5.3.7	<i>Considerações sobre o tamanho das peças a produzir</i>	42
3.5.4.	Configurações do enrolamento	42
3.5.4.1.	Forma cilíndrica com abobadas.....	42
3.5.4.2.	Forma esférica.....	42
3.5.4.3.	Formas Cilíndricas e veios.....	43
3.5.4.4.	Formas Cilíndricas planas (volantes de inércia).....	44
3.5.4.5.	Isogrelhas.....	44
3.5.5.	Padrões de enrolamento	44
3.5.5.1.	Enrolamento Helicoidal	44
3.5.5.2.	Enrolamento Polar.....	45
3.5.5.3.	Enrolamento Circunferencial.....	45
3.5.6.	Dimensionamento de componentes	46
3.5.7.	Custo do processo de enrolamento filamentar de termoendurecíveis e termoplásticos	46
4.	Estruturas em Sanduiche	49
4.1.	Perspetiva histórica.....	50
4.2.	Vantagens e desvantagens do uso de estruturas em sanduiche	51
5.	<i>Design</i> e Conceção de Peças Curvas em Compósitos	53
5.1.	Contração Volúmica	53
5.2.	Contração química após vitrificação	54
5.3.	Contração antes da vitrificação	54
5.4.	Interação molde-peça	56

5.5.	Consolidação	56
6.	Métodos de redução da permeabilidade das fibras -técnica de Pinch-off	57
7.	Tipos de Ligações	59
7.1.	Ligações aparafusadas e rebitadas.....	59
7.2.	Ligações coladas.....	61
7.3.	Ligações por fusão.....	64
8.	Manutenção e Técnicas de Inspeção	67
8.1.	Manutenção	67
8.1.1.	Efeitos Ambientais	67
8.1.1.1.	Radiação ultra-violeta (UV).....	67
8.1.1.2.	Fatores biológicos	68
8.1.1.3.	Corrosão e Incêndios	68
8.2.	Técnicas de inspeção.....	68
8.2.1.	Ensaio não destrutivo	68
8.2.1.1.	Tap Test.....	69
8.2.1.2.	Inspeção visual	69
8.2.1.3.	Inspeção combinada.....	69
9.	Reciclagem	71
9.1.	Reciclagem mecânica	71
9.2.	Reciclagem térmica	72
9.2.1.	Combustão com recuperação de energia	72
9.2.2.	Pirólise	72
9.2.3.	Processamento de leito fluidizado (“Fluidised bed processing”).....	72
10.	Ciclo de vida	75
10.1.	Análise do ciclo de vida do produto	75
10.2.	Avaliação do ciclo de vida do produto [ACV] (Life Cycle Assessment LCA)	75
10.3.	Descrição Geral do processo de análise do ciclo de vida de um produto	76
10.4.	Benefícios e limitações da implementação de uma eficaz análise do ciclo de vida.....	77
11.	Legislação e Requisitos Legislativos	79

11.1. Determinação do espaço residual	79
11.2. Estabilidade	80
11.3. Energia absorvida	82
11.4. Resistência da superestrutura.....	84
11.4.1. Ensaio de capotamento de um veículo completo.....	85
11.4.2. Ensaio de capotamento de uma secção da carroçaria	86
11.4.3. Ensaio com um pêndulo de uma secção da carroçaria.....	87
11.4.4. Verificação da resistência da superestrutura por aplicação de um método de cálculo	87
12. Critérios de Rotura de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica	89
12.1. Critérios de rotura baseados na resistência	89
12.1.1. Critério de Falha LaRC03 [32]	89
12.1.2. Critério Hashin	92
III-Trabalhos Práticos	
1. Conceção.....	95
2. Material Utilizado.....	99
2.1. Material do laminado	99
2.2. Material do núcleo da sanduiche	100
3. Empilhamento de Camadas Utilizado	103
4. Simulações	111
4.1. Valores de referência	111
4.2. Ensaio de Capotamento	112
4.3. Análise da carroçaria sujeita colisão frontal	128
4.4. Análise da carroçaria sujeita a uma colisão lateral	134
4.4.1. Análise da carroçaria sujeita a uma colisão lateral do lado direito	134
4.4.2. Análise da carroçaria sujeita a uma colisão lateral do lado esquerdo.....	138
4.5. Análise da carroçaria sujeita a uma colisão traseira	143
4.6. Análise da carroçaria sujeita a um ressalto e uma travagem.....	148
4.7. Determinação da rigidez torsional	153
4.8. Solução Final Otimizada	155

5. Estudo e Produção de Moldes	157
5.1. Solução Proposta.....	157
5.2. Solução Utilizada	161
5.2.1. Mandril utilizado para testar a viabilidade do processo de enrolamento a seco seguido de SCRIMP na secção central do Autocarro	161
5.2.2. Molde utilizado para testar a eficiência do processo de Picth off	162
6. Avaliação da viabilidade técnica do projeto	165
6.1. Produção de um protótipo da secção central do autocarro	165
6.2. Produção de um protótipo da lateral do autocarro por Picth off	181
7. Avaliação de Custos	187
IV- Discussão de resultados, Conclusões e Trabalhos Futuros	
1. Discussão de Resultados e Conclusões	193
2. Trabalhos Futuros	199
Referências Bibliográficas	201

Índice de Figuras

Figura 1 Gráfico comparativo da capacidade de resistência á tração da fibra de vidro usada no SCRIMP em relação aos métodos tradicionais figura retirada de [6].....	12
Figura 2 Comparação entre as características mecânicas obtidas usando a técnica de SCRIMP e a moldação manual, figura retirada de [6]	12
Figura 3 Aspeto da carroçaria do autocarro figura retirada de [6]	13
Figura 4 Análise estrutural realizada para aprovação do veículo (figura retirada de [7])	14
Figura 5 Molde da carroçaria do EcoRide BE35 (figura retirada de [7])	14
Figura 6 Carroçaria em fase final de acabamento (figura retirada de [7])	14
Figura 7 Autocarro montado em fase final de montagem e acabamento (figura retirada de [7])	14
Figura 8 Autocarro em circulação na região do Colorado USA (figura retirada de [7])	14
Figura 9 Autocarro Hybrid electric bus (figura retirada de [8])	15
Figura 10. Esquema do processo de moldação por vácuo, figura retirada de [13].....	30
Figura 11 Representação esquemática do processo de SCRIMP, figura retirada de [15]	32
Figura 12 Esquema da montagem para a realização de SCRIMP, figura retirada de [15].....	33
Figura 13. Esquema do processo de centrifugação, figura retirada de [13]	34
Figura 14 Configurações do enrolamento helicoidal com diversos graus de entrecruzamento, Figura retirada da referência [18].....	36
Figura 15. Exemplo ilustrativo do funcionamento do processo de enrolamento filamental, figura retirada de [13]	36

Figura 16 Custos relevantes do enrolamento filamentar de termoendurecíveis e termoplásticos (adaptado de [21]).....	47
Figura 17 Componentes de uma estrutura sandwich, figura retirado de [22].....	49
Figura 18 Variação do ângulo e da espessura do laminado com o processo de cura retirado de [26].....	55
Figura 19 Técnicas de Pinch-off (adaptado de [27]).....	57
Figura 20. Tipos de sobreposição, retirado dos apontamentos da disciplina de materiais compósitos do professor António Torres Marques [28].....	60
Figura 21. Esquema representativo dos modos de rotura em ligações aparafusadas, retirado dos apontamentos da disciplina de materiais compósitos do professor António Torres Marques [28]	60
Figura 22. Esquema explicativo das relações geométricas, retirado dos apontamentos da disciplina de materiais compósitos do professor António Torres Marques [28]	61
Figura 23. Tipos de juntas coladas, retirado dos apontamentos da disciplina de materiais compósitos do professor António Torres Marques [28].....	62
Figura 24. Modos de rotura de ligações coladas em materiais compósitos, retirado dos apontamentos da disciplina de materiais compósitos do professor António Torres Marques [28]	63
Figura 25. Esquema representativo do processamento de leito fluidizado, retirado de [13]	73
Figura 26 Etapas do ciclo de vida de um produto (retirado de [29])	76
Figura 27 Etapas de uma análise ACV de acordo com a norma ISO14040:1997 [30]	77
Figura 28 Imagem representativa do espaço residual em corte transversal, retirado de [1].....	80
Figura 29 Imagem representativa do espaço residual em corte longitudinal, retirado de [1]	80
Figura 30 Imagem representativa do ensaio de capotamento total da viatura, retirado de [1]	85
Figura 31 Desenho virtual do FEUPBUS/CIVITAS	96
Figura 32 Vista Lateral do autocarro	96
Figura 33 Vista da frente do autocarro	96
Figura 34 Vista da traseira do autocarro	96
Figura 35 Autocarro com a respetiva plataforma para a entrada de pessoas de mobilidade reduzida	97
Figura 36 Vista de cima do autocarro com a respetiva disposição provável de lugares.....	97
Figura 37 Variação das principais propriedades mecânicas em função do ângulo Θ , figura retirada do software ESACOMP® 4.4.1	100
Figura 38 Variação das principais propriedades mecânicas em função do ângulo Θ para o ninho de abelha HRH-10-1/4-4 , figura retirada do software ESACOMP® 4.4.1	102
Figura 39 Representação gráfica na forma polar da variação dos valores do módulo de elasticidade longitudinal e transversal em função da direção para o HRH-10-1/4-4 , figura retirada do software ESACOMP® 4.4.1	102
Figura 40 Vista de Corte do autocarro com a representação da localização das diferentes secções utilizadas .	103
Figura 41 Representação esquemática das sequências de empilhamento estudadas para o enrolamento do corpo do FEUP BUS, figura retirada do software ESACOMP® 4.4.1	104
Figura 42 Representação esquemática das sequências de empilhamento estudadas para o enrolamento dos pilares do FEUP BUS, figura retirada do software ESACOMP® 4.4.1.....	105
Figura 43 Variação das principais propriedades mecânicas em função do ângulo Θ para os laminados que constituem o corpo da carroçaria do autocarro retirado do ESACOMP® 4.4.1	105
Figura 44 Representação gráfica dos valores dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal á flexão no plano do laminado em função da sua orientação para as secções que constituem o corpo da carroçaria do autocarro retirado do ESACOMP® 4.4.1	106
Figura 45 Variação das principais propriedades mecânicas em função do ângulo Θ para os laminados que constituem os pilares da carroçaria do autocarro retirado do ESACOMP® 4.4.1	107

Figura 46 Representação gráfica dos valores dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal á flexão no plano do laminado em função da sua orientação para as secções que constituem a carroçaria do autocarro retirado do ESACOMP® 4.4.1	107
Figura 47 Autocarro Mercedes-Benz Tourino	112
Figura 48 Representação dos apoios na secção central para o ensaio estático de capotamento	113
Figura 49 Representação cargas instaladas na secção central para o ensaio estático de capotamento	113
Figura 50 Representação gráfica das deformações ocorridas na estrutura para o ensaio estático de capotamento (fator de escala de 1x)	114
Figura 51 Vista de frente da deformação causada pelo ensaio de capotamento estático (fator de escala de 1X)	114
Figura 52 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central carroçaria	115
Figura 53 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central carroçaria	115
Figura 54 Vista da propagação do dano á tração das fibras da lateral esquerda da secção central carroçaria ..	115
Figura 55 Vista da propagação do dano á tração das fibras da lateral direita da secção central carroçaria	116
Figura 56 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria	116
Figura 57 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central carroçaria	116
Figura 58 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria ..	117
Figura 59 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central carroçaria	117
Figura 60 Vista de frente da deformação causada pelo ensaio de capotamento estático para a 2ª opção estudada (fator de escala de 1X)	118
Figura 61 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central carroçaria para a segunda solução encontrada	118
Figura 62 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central carroçaria para a segunda solução estudada	119
Figura 63 Vista da propagação do dano á tração das fibras da lateral esquerda da secção central carroçaria para a segunda solução encontrada	119
Figura 64 Vista da propagação do dano á tração das fibras da lateral direita da secção central carroçaria para a segunda opção estudada	119
Figura 65 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria da segunda solução encontrada	120
Figura 66 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central carroçaria da segunda opção analisada	120
Figura 67 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria da segunda solução encontrada	120
Figura 68 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central carroçaria da segunda opção analisada	121
Figura 69 Vista de frente da deformação causada pelo ensaio de capotamento estático para a 4ª opção estudada (fator de escala de 1X)	122
Figura 70 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central carroçaria para a quarta solução encontrada	122
Figura 71 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central carroçaria para a quarta solução encontrada	122

Figura 72 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral esquerda da secção central carroçaria da quarta solução encontrada	123
Figura 73 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral direita da secção central carroçaria da quarta solução encontrada.....	123
Figura 74 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria da quarta solução encontrada	123
Figura 75 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central carroçaria da quarta solução encontrada	124
Figura 76 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria da quarta solução encontrada	124
Figura 77 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central carroçaria da quarta solução encontrada.....	124
Figura 78 Vista de frente da deformação causada pelo ensaio de capotamento estático para a 5ª opção estudada (fator de escala de 1X)	125
Figura 79 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria para a quinta solução encontrada	125
Figura 80 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria para quinta solução encontrada	126
Figura 81 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral esquerda da secção central da carroçaria da quinta solução encontrada	126
Figura 82 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral direita da secção central da carroçaria da quinta solução encontrada	126
Figura 83 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria da quinta solução encontrada	127
Figura 84 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central da carroçaria da quinta solução encontrada	127
Figura 85 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria da quinta solução encontrada	127
Figura 86 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central da carroçaria da quinta solução encontrada	128
Figura 87 Representação dos apoios na secção central para a análise de uma colisão frontal.....	129
Figura 88 Representação cargas instaladas na secção central para a análise de uma colisão frontal.....	129
Figura 89 Representação da localização das massas concentradas representativas dos sistemas auxiliares	129
Figura 90 Vista tridimensional das deformações resultantes do ensaio de colisão frontal (fator de escala de 1x)	130
Figura 91 Vista lateral direita das deformações resultantes do ensaio de colisão frontal (fator de escala de 1x)	130
Figura 92 Vista lateral esquerda das deformações resultantes do ensaio de colisão frontal (fator de escala de 1x)	130
Figura 93 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal	131
Figura 94 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal	131
Figura 95 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal	131

Figura 96 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal.....	132
Figura 97 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal	132
Figura 98 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal	132
Figura 99 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal.....	133
Figura 100 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal.....	133
Figura 101 Representação dos apoios na secção central para a análise de uma colisão lateral do lado direito	134
Figura 102 Representação cargas instaladas na secção central para a análise de uma colisão lateral do lado direito	134
Figura 103 Vista tridimensional das deformações resultantes do ensaio de colisão na lateral direita do autocarro(fator de escala de 1x)	135
Figura 104 Vista de frente das deformações resultantes do ensaio de colisão na lateral direita do autocarro (fator de escala de 1x)	135
Figura 105 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro	136
Figura 106 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro	136
Figura 107 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro	136
Figura 108 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro	137
Figura 109 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro	137
Figura 110 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro	137
Figura 111 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro	138
Figura 112 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro	138
Figura 113 Representação dos apoios na secção central para a análise de uma colisão lateral do lado esquerdo	139
Figura 114 Representação cargas instaladas na secção central para a análise de uma colisão lateral do lado esquerdo	139
Figura 115 Vista tridimensional das deformações resultantes do ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro(fator de escala de 1x)	139
Figura 116 Vista de frente das deformações resultantes do ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro (fator de escala de 1x)	140
Figura 117 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro	140
Figura 118 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro	141
Figura 119 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro	141

Figura 120 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro.....	141
Figura 121 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro	142
Figura 122 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro	142
Figura 123 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro	142
Figura 124 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro.....	143
Figura 125 Representação dos apoios na secção central para a análise de uma colisão traseira	144
Figura 126 Representação cargas instaladas na secção central para a análise de uma colisão traseira	144
Figura 127 Vista tridimensional das deformações resultantes do ensaio de colisão traseira (fator de escala de 1x)	144
Figura 128 Vista lateral esquerda das deformações resultantes do ensaio de colisão traseira (fator de escala de 1x)	145
Figura 129 Vista lateral direita das deformações resultantes do ensaio de colisão traseira (fator de escala de 1x)	145
Figura 130 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira	145
Figura 131 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira	146
Figura 132 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira	146
Figura 133 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira	146
Figura 134 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira	147
Figura 135 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira	147
Figura 136 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira	147
Figura 137 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira	148
Figura 138 Representação dos apoios na secção central para a análise de um ressalto simultâneo com uma travagem	149
Figura 139 Representação cargas instaladas na secção central para a análise de um ressalto simultâneo com uma travagem	149
Figura 140 Vista tridimensional das deformações resultantes da simulação de esforço simultâneo de ressalto e travagem (fator de escala de 1x)	149
Figura 141 Vista lateral esquerda das deformações resultantes das solicitações combinadas de ressalto e travagem (fator de escala de 1x)	150
Figura 142 Vista lateral direita das deformações resultantes das solicitações combinadas de ressalto e travagem (fator de escala de 1x).....	150
Figura 143 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem	150

Figura 144 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem	151
Figura 145 Vista da propagação do dano á tração das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem	151
Figura 146 Vista da propagação do dano á tração das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem	151
Figura 147 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem	152
Figura 148 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem	152
Figura 149 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem	152
Figura 150 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem	153
Figura 151 Representação dos apoios na secção central para a análise da rigidez torsional	154
Figura 152 Representação cargas instaladas na secção central para a análise da rigidez torsional da estrutura	154
Figura 153 Representação gráfica das deformações ocorridas na estrutura no ensaio de rigidez torsional	154
Figura 154 Vista da lateral direita da deformação causada pelo ensaio de rigidez torsional (fator de escala de 25X)	155
Figura 155 Vista geral da solução final adotada.....	156
Figura 156 Representação em vista isométrica do mandril	157
Figura 157 Mandril após a conclusão da primeira fase de desmontagem do mandril	158
Figura 158 Mandril após a conclusão da segunda fase de desmontagem do mandril	158
Figura 159 Vista frontal do mandril após a conclusão da 3ª etapa de desmontagem.....	159
Figura 160 Vista em corte do mandril após a conclusão da 4ª etapa de desmontagem	159
Figura 161 Representação em Corte do mandril	160
Figura 162 Mandril utilizado á chegada ao INEGI	161
Figura 163 representação em corte da solução em MDF	162
Figura 164 Representação em corte da solução em aço	162
Figura 165 Representação em corte do acoplamento entre as barras e o mandril existente	162
Figura 166 Chapa representativa da forma da secção do autocarro	163
Figura 167 Chapa representativa da forma da janela central do autocarro	163
Figura 168 Molde para a realização de Picth off da janela central do autocarro	164
Figura 169 Representação em corte do funcionamento do sistema de Picth off proposto	164
Figura 170 Mandril montado na bucha da máquina de enrolamento	165
Figura 171 Enrolamento de teste para verificar o correto desenvolvimento do programa	166
Figura 172 Preparação do mandril com desmoldante	166
Figura 173 Aplicação de Melinex® sobre o mandril	166
Figura 174 Início do processo de enrolamento (colagem da ponta de roving ao mandril)	167
Figura 175 Início do processo de enrolamento	167
Figura 176 Aspeto do enrolamento decorridos metade dos ciclos programados	167
Figura 177 Aspeto final do enrolamento decorridos todos os ciclos programados	167
Figura 178 Isolamento interno do mandril	168
Figura 179 Aspeto final do mandril após o incidente	168
Figura 180 Corte e retirada das fibras após incidente	168

Figura 181 Aspeto final de uma das faces do mandril após a colocação de fita desmoldante e aplicação das 5 camadas de desmoldante	169
Figura 182 Ferramenta utilizada na perfuração dos núcleos	169
Figura 183 Núcleos após o processo de perfuração	169
Figura 184 Aspeto final terminado o enrolamento da pele inferior da sanduiche	170
Figura 185 Conformação do núcleo ao mandril	170
Figura 186 Núcleo que sofreu rotura durante o processo de colagem á pele inferior	170
Figura 187 Início do processo de enrolamento da pele superior da sanduiche	170
Figura 188 Aspeto final da estrutura após finalizado o enrolamento a seco	170
Figura 189 Deposição de “peel ply” sobre a estrutura enrolada	171
Figura 190 Instalação das espirais	171
Figura 191 Deposição do filme perfurado e da rede de homogeneização com a abertura de canal	171
Figura 192 Instalação de uma espiral intermédia para melhor impregnação da sanduiche	172
Figura 193 Colocação do saco de vácuo	172
Figura 194 Tentativa de tapar as pequenas fugas de ar existentes com fita selante	172
Figura 195 instalação das mangueiras de abastecimento e recolha de resina	173
Figura 196 Início do processo de impregnação da estrutura enrolada	173
Figura 197 Metade inferior do mandril totalmente impregnada de resina	174
Figura 198 Fase inicial da impregnação da metade superior do mandril	174
Figura 199 Aspeto da pele superior da sanduiche passados 45 minutos do início da infusão	175
Figura 200 Aspeto da estrutura após terminado o processo de infusão	175
Figura 201 Vista da peça a produzir após a retirada da película do saco de vácuo	176
Figura 202 Vista da peça durante o processo de retirada da rede homogeneização, filme poroso e “peel ply” na metade superior	176
Figura 203 Vista de frente da peça fabricada após termos retirado a rede, o tecido poroso e o “peel ply”	177
Figura 204 Início do processo de desmontagem do mandril	177
Figura 205 Mandril já parcialmente desmontado	178
Figura 206 Aspeto da peça produzida após a retirada do mandril	178
Figura 207 Aspeto final da peça produzida	179
Figura 208 Peça final produzida antes da operação de impregnação manual	179
Figura 209 Aspeto Geral do protótipo do corpo central do autocarro	180
Figura 210 Pormenor do interior do protótipo produzido evidenciando as fibras secas	180
Figura 211 Aspeto geral do interior da peça produzida após a impregnação manual	180
Figura 212 Vista em pormenor do interior da peça produzida após efetuada a impregnação manual	181
Figura 213 Preparação do núcleo para o processo de pitch off (corte do interior do núcleo com as dimensões da janela)	182
Figura 214 Preparação do núcleo de forma a melhorar a impregnabilidade do laminado	182
Figura 215 Corte e preparação dos tecidos de fibra de vidro	183
Figura 216 Colocação e aperto do contramolde sobre as fibras secas	183
Figura 217 Deposição dos tecidos técnicos sobre as fibras	184
Figura 218 Instalação das espirais necessárias para o processo de SCRIMP	184
Figura 219 Corte e preparação do saco de vácuo	185
Figura 220 Instalação do saco de vácuo	185
Figura 221 Aspeto Final da peça findo o processo de impregnação	185
Figura 222 Aspeto da peça após termos retirado os tecidos técnicos e o contra-molde	186
Figura 223 Árvore de processos simplificada para o ciclo de vida de um autocarro	190

Figura 224 Regiões do autocarro danificadas no ensaio de capotamento	194
Figura 225 Resultado final do processo de Picth off com identificação das regiões secas	196

Índice de Tabelas

Tabela 1 Vítimas de acidentes de viação, por tipo de veículo retirado da referência [11]	18
Tabela 2 Acidentes de viação e vítimas no continente, por natureza do acidente retirado da referência [11] ...	18
Tabela 3. Comparação de propriedades entre fibras e materiais na sua forma maciça/convencional. Tabela adaptada a partir dos apontamentos de A.G. Magalhães [13].	22
Tabela 4. Propriedades mecânicas das fibras de vidro E, S e R , tabela adaptada de [13]	23
Tabela 5. Comparação de propriedades entre termoendurecíveis e termoplásticos retirado de [13]	25
Tabela 6. Vantagens e desvantagens do processo de moldação por vácuo	30
Tabela 7. Vantagens e desvantagens do processo de RTM.	31
Tabela 8. Vantagens e desvantagens do processo de centrifugação.	34
Tabela 9. Vantagens e desvantagens do processo de centrifugação.	35
Tabela 10 Principais vantagens de cada padrão de enrolamento filamentar	45
Tabela 11 Vantagens e desvantagens do processo de enrolamento filamentar.	47
Tabela 12 Modos de falha e respetivas causas em estruturas sandwich adaptado de [23]	50
Tabela 13 Vantagens e desvantagens da construção sandwich, retirado de [25]	51
Tabela 14. Vantagens e desvantagens do uso de ligações aparafusadas e rebitadas	59
Tabela 15. Vantagens e desvantagens das ligações coladas.	61
Tabela 16. Vantagens e desvantagens das ligações por fusão	65
Tabela 17 Critérios de Hashin para o caso bidimensional de tensões	92
Tabela 18 Propriedades gerais do reforço a utilizar	99
Tabela 19 Propriedades mecânicas.	99
Tabela 20 Coeficientes de expansão térmicos e de humidade	99
Tabela 21 Valores nominais para as primeiras tensões e deformações de falha	99
Tabela 22 Valores nominais finais para as tensões e deformações de falha	100
Tabela 23 Densidade da espuma a utilizar	100
Tabela 24 Propriedades mecânicas da espuma Strucell P80	100
Tabela 25 Valores nominais para as primeiras tensões e deformações de falha para o Strucell P80	100
Tabela 26 Valores mínimos para as tensões e deformações de falha para o Strucell P80	101
Tabela 27 Densidade do ninho de abelha de referência HRH-10-1/4-4	101
Tabela 28 Propriedades mecânicas do ninho de abelha de referência HRH-10-1/4-4	101
Tabela 29 Valores nominais para as primeiras tensões e deformações de falha do ninho de abelha de referência HRH-10-1/4-4	101
Tabela 30 Valores mínimos para as tensões e deformações de falha do ninho de abelha de referência HRH-10-1/4-4	101
Tabela 31 Valores de carga críticos á tração para o laminado que constitui a versão 2 para o corpo do autocarro	107
Tabela 32 Valores de carga críticos á tração para o laminado que constitui a versão 3 para o corpo do autocarro	108
Tabela 33 Valores de carga críticos á tração para o laminado que constitui a versão 2 para os pilares do autocarro	108
Tabela 34 Valores de carga críticos á tração para o laminado que constitui versão 3 para os pilares do autocarro	108

Tabela 35 Valores de carga críticos á compressão para o laminado que constitui o corpo do autocarro versão 2	109
Tabela 36 Valores de carga críticos á compressão para o laminado que constitui o corpo do autocarro versão 3	109
Tabela 37 Valores de carga críticos á compressão para o laminado que constitui os pilares versão 2	109
Tabela 38 Valores de carga críticos á compressão para o laminado que constitui os pilares versão 3	110
Tabela 39 Custos inerentes á produção da carroçaria do autocarro	190

I-Introdução

1. Objetivo

Com este trabalho pretende-se projetar e conceber uma estrutura sanduíche utilizando materiais compósitos para um autocarro constituído por um chassi e uma carroçaria que não tenha menos resistência nem menos rigidez que a correspondente construída em aço.

Assim, os objetivos são:

- Dimensionar uma estrutura com resistência e rigidez específicas superiores à de uma estrutura em aço;
- Redução de peso em 20%;
- A integração de componentes;
- A utilização de materiais resistentes à corrosão;
- Aumento da segurança passiva, em especial o roll-over;
- Testar a viabilidade técnica da obtenção da estrutura utilizando os processos de enrolamento a seco seguido de SCRIMP.

Para que seja possível atingir os objetivos propostos é necessário realizar:

- Simulação estrutural (MEF) de uma proposta de empilhamento para o autocarro em Roll-Over;
- Simulação estrutural (MEF) da carroçaria do autocarro sujeita a solicitações representativas do uso quotidiano.

1. Objetivo

2. Introdução

Fazendo uma pequena análise histórica da evolução dos processos de fabrico de peças em materiais compósitos verifica-se que a técnica de enrolamento filamentar é utilizada para a produção de uma grande diversidade de peças. Este processo permite a obtenção de elementos que vão desde a simples tubagem para distribuição e saneamento de água a revestimentos exteriores para motores de foguetões para a exploração aeroespacial, passando por reservatórios de pressão, comboios, etc...

Esta grande variedade de aplicações permitida pelo processo garante em absoluto que existem soluções para a produção de peças tubulares de secção quadrada com paredes quase planas e de grandes dimensões, permitindo então afirmar *á priori* que é possível a produção da carroçaria do autocarro utilizando este processo.

Especificamente avançou-se para esta solução porque permite uma redução de peso da estrutura que é significativa, pode chegar a 20%, da secção que se pretende substituir. Paralelamente esta solução também permite reduzir de forma significativa ou mesmo eliminar o fenómeno de corrosão habitual neste género de estruturas principalmente quando operam nas proximidades de zonas costeiras.

Com a modificação do processo construtivo surge um novo campo de oportunidades do ponto de vista construtivo, pois é possível conseguir uma muito maior integração de componentes sendo assim possível simplificar em grande medida o processo de montagem da estrutura.

A utilização de novos materiais também vai permitir uma maior e mais fácil reciclagem dos componentes, como veremos mais adiante.

Relativamente aos parâmetros de segurança a nova estrutura a conceber vai permitir que o veículo apresente uma maior resistência ao impacto, uma vez que é possível utilizar elementos de grande resistência ao impacto nas zonas tradicionalmente mais sujeitas ao choque.

A nível estrutural verifica-se que é possível, mantendo inalterado o chassis do autocarro, conceber uma superestrutura em material compósito capaz de cumprir satisfatoriamente as seguintes normas e regulamentos:

- Diretiva 2001/85/CE[1] do parlamento europeu e do conselho de 20 de Novembro de 2001 relativa a disposições especiais aplicáveis aos veículos destinados ao transporte de passageiros com mais de 8 lugares sentados além do lugar do condutor alterando esta as diretivas anteriores 70/156/CEE e 97/27/CE;
- Regulation UNECE no.66 [2]uniform provision concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure.

Numa fase posterior do projeto será necessário submete-la a diversas análises comparando os resultados obtidos pela solução tradicional em aço á nova solução proposta. Podendo as análises ser estáticas ou dinâmicas e não havendo a possibilidade, por limitações de tempo, de fazer ensaios práticos, recorreremos ao uso de *software* comercial de elementos finitos. Nestas simulações será utilizado o *software* o Abaqus Standard .

3. Benefícios Potenciais

Antes de prosseguirmos com o desenvolvimento do trabalho achamos por bem realizar um pequeno ponto prévio para esclarecer quais os benefícios e vantagens em produzir um veículo de transporte coletivo em materiais compósitos.

Verificando-se que na atualidade os autocarros ainda são essenciais para o transporte de massas, circulando em 2000 nas estradas da união europeia cerca de 500000 destes veículos, conceber então, estruturas com maior valor de mercado e que simultaneamente conseguem ser mais leves, mais duráveis e apresentar melhores prestações dinâmicas. Sendo mais amigas do meio ambiente, só pode ser vantajoso.

3.1. Peso

Uma carroçaria, como a que está em estudo, realizada segundo os processos tradicionais em aço pesará cerca de duas toneladas variando consoante o tamanho do autocarro e a empresa que o concebe entre 2000 e 2500 kg, ora com este projeto utilizando novos materiais e processos de fabrico será possível obter uma redução de peso da carroçaria de cerca de 20%. Esta redução de peso ocorre, porque o material que pretendemos utilizar tem melhores propriedades específicas, ou seja, é necessário menos massa de material para obter um produto com melhores características que o obtido segundo o processo tradicional. Verificamos simultaneamente que os processos construtivos envolvendo materiais compósitos permite uma melhor e maior integração de componentes. Sendo assim é simplificado o processo produtivo diminuindo o peso da estrutura resultante, uma vez que serão utilizados menos componentes o que diminui o número de elementos da ligação necessários.

Sintetizando as ideias descritas ao longo do parágrafo anterior, podemos dizer que a produção de uma carroçaria em materiais compósitos permite uma redução dos consumos da viatura, verificando-se também que com a redução do peso da carroçaria é possível um aumento do valor da carga útil do veículo, tornando assim possível o transporte de um maior número de pessoas e bens. Se pretendermos manter o valor de carga útil então será possível diminuir o tamanho das rodas e pneumáticos o que levará a uma melhoria das características dinâmicas dos autocarros, ocorrendo assim uma diminuição do teor dos valores da poluição atmosférica.

3.2. Ligações entre elementos

Havendo o conhecimento que as estruturas tradicionais dos autocarros são realizadas em aço, ou na melhor das hipóteses em alumínio têm que ser utilizados diversos elementos de ligação para unir os múltiplos componentes que as constituem. Essas ligações são normalmente feitas usando parafusos ou por meio de adesivos levando a existência de um grande número de elementos que necessitam de dimensionamento, produção, armazenagem e controlo individual de qualidade. Verificando-se essa mesma realidade para os conjuntos de componentes, a incorporação de um novo processo produtivo que representa uma redução parcial do número de peças só pode ser considerado vantajoso uma vez que vai promover uma redução real dos custos produtivos e levando na mesma medida a uma redução do tempo de montagem do autocarro.

3.3. Corrosão

A utilização de materiais compósitos de origem polimérica com elevada resistência aos fenómenos corrosivos representa uma significativa redução dos custos de reparação e manutenção. Estudos relativos á manutenção de autocarros indicam que ao longo da sua vida útil um autocarro produzido em aço necessita de reparações para corrigir problemas relacionados com fenómenos de corrosão que representam cerca de 10 % do seu valor de aquisição, não sendo ainda considerado neste estudo o custo da imobilização do veículo. Logo conseguir prolongar a vida útil do veículo por mais de 20 anos sem que este tenha de sofrer intervenções só pode gerar enormes ganhos económicos que deixarão os operadores públicos ou privados muito satisfeitos.

3.4. Segurança Passiva

Ao longo dos anos e da evolução dos transportes coletivos verificou-se uma crescente consciencialização para a importância da definição de altos parâmetros de segurança passiva dos autocarros, como tal têm-se verificado uma melhoria significativa deste requisito nos autocarros mais modernos. Ora esta melhoria exigida pelos clientes e pelas normativas europeias leva que os fabricantes de autocarros tenham que cumprir requisitos cada vez mais complexos. Verificando-se que neste momento o requisito que apresenta maior complexidade para os produtores é o ensaio de capotamento do veículo. Uma melhoria significativa neste parâmetro levará a uma redução dos danos resultantes de cerca de 6 % dos acidentes deste tipo de viatura. Neste requisito também é possível verificar uma melhoria significativa dos resultados obtidos com o uso de materiais compósitos, uma vez que estes apresentam como sabemos valores elevados das suas propriedades específicas, sendo ainda permitido utilizar as suas propriedades de direccionalidade e flexibilidade do processo produtivo para melhorar os seus resultados.

3.5. Manutenção e Reciclagem

Tal como vamos ter a oportunidade de verificar mais adiante no trabalho, e ao contrário do que é a perceção geral, a manutenção quer preventiva, quer em caso de acidente é mais económica, mais fácil de executar e mais rápida que a congénere realizada nas estruturas tradicionais.

Tendo conhecimento que a reciclagem de materiais compósitos de matriz termoendurecível não é muito fácil se forem utilizadas resinas termoplásticas abre-se um novo campo de oportunidades para as empresas que realizam a reciclagem deste género de materiais. A reciclagem de materiais compósitos com resinas termoplásticas é mais fácil permitindo a separação e reutilização do material constituinte da matriz e do reforço.

3.6. Desenvolvimento de novas tecnologias e ensaios

O desenvolvimento deste género de projetos permite á empresa um aumento dos conhecimentos dos seus colaboradores permitindo assim que estes apresentem maior eficiência e eficácia que pode ser utilizado no desenvolvimento de outras estruturas similares.

Com o desenvolvimento deste processo será possível aumentar o conhecimento nas seguintes áreas:

- Simulação de estruturas de grandes dimensões sujeitas a situações de cargas de impacto;

- Simulação de dano para estruturas complexas, recorrendo-se para tal a critérios de rotura avançados;
- Definição de uma matriz de ensaios para situações que não estão previstas para ensaios normalizados;
- Validação experimental de modelos em situações que estavam pouco documentadas.

II- Pesquisa Bibliográfica

1. O Autocarro [3, 4]

A ideia do autocarro [3,4] como um meio de transporte coletivo de pessoas remonta a 1662 sendo criado pelo francês Blaise Pascal. No entanto só começa a ser efetivamente desenvolvido em França por volta do ano de 1826, quando Stanislav Baudry decide procurar desenvolver um meio eficaz de transporte que permitisse levar as pessoas do centro da cidade de Nantes até à sua estação de banhos públicos que ficava em Richebourg. O primeiro veículo destinado ao transporte coletivo de pessoas criado por Stanislav Baudry não era mais que uma carroça provida com alguns bancos de madeira, mas que permitia a época transportar de forma eficaz pessoas, mercadorias e correio.

Ao longo da primeira metade do século XIX foram implementadas em diversas cidades da Europa e Estados Unidos estes meios de transporte. Durante o seu período expansionista a ideia original de autocarro foi evoluindo aparecendo em Inglaterra por volta de 1830 o primeiro veículo a motor propriamente dito em que o cavalo era substituído por uma caldeira a vapor. O primeiro autocarro como o conhecemos hoje foi inventado por Karl Benz fundador da marca Mercedes-Benz, possuía um motor de combustão interna a gasolina de cerca de 5 CV e permitia que 8 pessoas se deslocassem a uma velocidade máxima de 15 Km/h.

A implementação de um serviço forte e eficaz de transportes públicos nomeadamente de autocarros permitiu revolucionar o transporte de pessoas e mercadorias tendo enormes repercussões do ponto de vista social e urbanístico. Se inicialmente eram apenas destinados à classe média e alta, hoje passados muitos anos, são destinados a todas as pessoas permitindo colocar cada vez mais pessoas a fazer viagens cada vez mais longas entre as suas residências e os seus trabalhos em tempos cada vez mais curtos e com maior comodidade. Com o advento do autocarro apareceram também o comboio e mais recentemente o avião que permitem uma mobilidade nunca sequer imaginada no século XIX.

1.1. Produtores de autocarros em materiais compósitos\Soluções já desenvolvidas

Durante o processo de pesquisa inerente a qualquer trabalho deste género verificamos que, apesar do interesse demonstrado pelas companhias de transportes coletivos, ainda existem poucas empresas que se dediquem à produção de autocarros em materiais compósitos. Existindo no entanto em estudo nas diversas universidades da Europa projetos que visam a implementação de um novo paradigma de mobilidade urbana e incluem o desenvolvimento de autocarros mais leves e eficientes.

No entanto da informação que podemos obter todas as empresas envolvidas neste negócio se referem a estes autocarros como sendo significativamente mais leves apresentando melhores características mecânicas e de segurança, sendo também melhores para o meio ambiente. Para além de tudo ainda apresentam uma melhor resistência à corrosão e a fatores biológicos que os tradicionais, como já foi referido anteriormente.

Seguidamente fazemos uma breve referência a cada um dos produtores e aos seus projetos no âmbito da construção de autocarros em compósitos.

1.1.1. Projeto FEUP/CIVITAS

De acordo com o referido no artigo [5] este trabalho pretendia satisfazer o âmbito do projeto CIVITAS ELAN é uma parceria entre a FEUP, a CM do Porto e a CIVITAS (Cleaner and Better Transport in Cities) visava a construção de miniautocarro para o transporte de pessoas dentro das cidades .

Este autocarro tem a particularidade de ter um piso elevado, o que implicou a alteração das estações onde o autocarro realiza paragem, o que obrigou á construção de novas paragens nesses lugares. A vantagem da utilização de paragens elevadas é permitir a rápida entrada de passageiros, uma vez que, não existem degraus a subir e permitir a entrada de pessoas de cadeira de rodas de forma simples e eficaz.

Por restrições orçamentais, a equipa encarregue do desenvolvimento deste projeto optou por utilizar um chassis de um mini autocarro de marca Toyota e modelo Coaster sobre o qual conceberam uma nova carroçaria em resina de vinilester reforçada com fibra de vidro.

A nova carroçaria é constituída por duas partes realizadas separadamente e que posteriormente são coladas com adesivo estrutural.

Cada uma das duas peças é realizada numa sanduiche de resina, espuma de PVC e fibra de vidro sendo as peças realizadas por SCRIMP, que basicamente consiste na injeção de resina e vácuo de forma a impregnar e consolidar o laminado, em molde aberto, como teremos a oportunidade de explicar mais adiante. Este processo permite a obtenção de peças com boas características mecânicas e com acabamento superficial.

Em relação ao dimensionamento estrutural a equipa recorreu a programas computacionais de simulação numérica tendo utilizado principalmente o método de elementos finitos, sendo construídas duas amostras do piso e uma de um pilar para realizar ensaios fazendo-se a comparação dos resultados práticos com os resultados obtidos no software.

Para realizar o ensaio estrutural da carroçaria foi utilizado o software Abaqus sendo os resultados obtidos iguais ou melhores aos da carroçaria original mas com uma poupança de peso na ordem dos 30%.

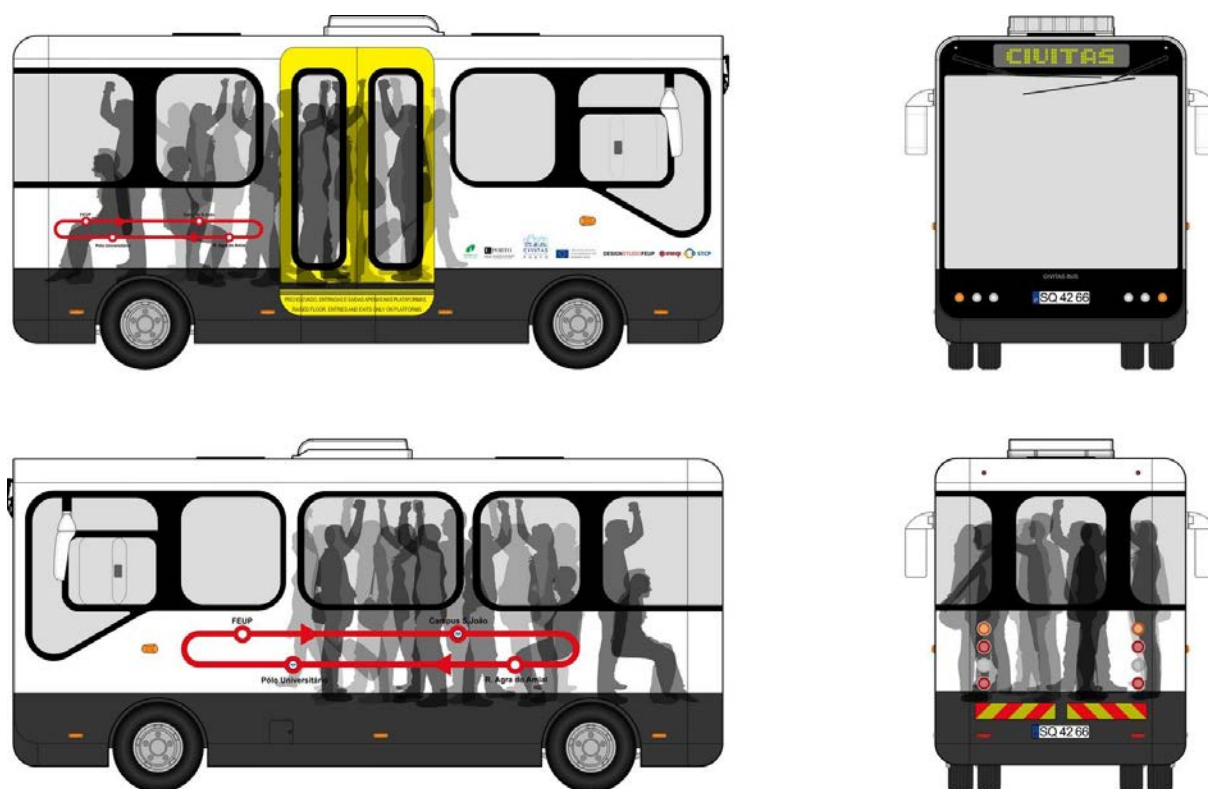


Figura 1 Aspeto do FEUPBUS/CIVITAS retirado de [5]

1.1.2. North American Bus Industries - CompoBus Metro 45C-2FW

Esta empresa é responsável por desenvolver e colocar no mercado o modelo NABI CompoBus Metro 45C-2FW[6] que é um autocarro de 1 andar de piso rebaixado com capacidade para transportar 47 pessoas sentadas. Tem uma carroçaria constituída por uma sanduiche em que as peles são realizadas maioritariamente de fibra de vidro, com segmentos em fibra de carbono e os núcleos são formados por espumas e madeira.

O autocarro possui 102 polegadas de largura (≈ 2.59 metros), uma altura de 127 polegadas (≈ 3.23 metros) e um comprimento de 45.6 polegadas (≈ 14 metros) estando disponível com múltiplas motorizações, desde motores a diesel a motores que funcionam a GPL, sendo ainda adaptáveis para poder utilizar combustíveis alternativos.

A carroçaria deste autocarro é como a que vimos para o projeto FEUPBUS/CIVITAS construída pelo processo de SCRIMP, de resina de Vinilester com o reforço a ser efetuado em fibra de vidro. Segundo o fabricante com a utilização desta técnica é possível obter estruturas com excelentes propriedades a tração e ao impacto como o demonstrado pelos seguintes gráficos:

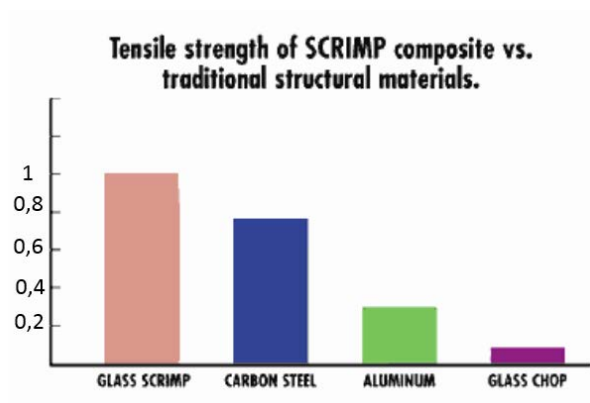


Figura 1 Gráfico comparativo da capacidade de resistência á tração da fibra de vidro usada no SCRIMP em relação aos métodos tradicionais figura retirada de [6]

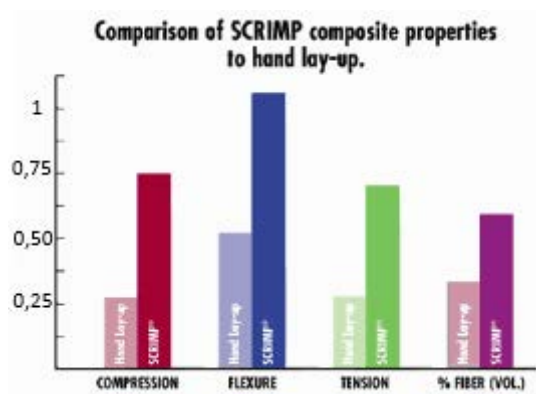


Figura 2 Comparação entre as características mecânicas obtidas usando a técnica de SCRIMP e a moldação manual, figura retirada de [6]

Para garantir que o autocarro produzido cumpre os requisitos legislativos impostos, a NABI realiza múltiplos ensaios práticos de forma a comprovar as análises teóricas efetuadas utilizando o método de elementos finitos.

Não falando da comodidade deste autocarro, uma vez que não deve diferir muito do que se pode ter num autocarro equivalente construído nos materiais convencionais, podemos falar noutro campo muito importante para a rentabilização deste género de veículo a manutenção em caso de colisão. Ora, para esta situação o fabricante refere que a operação de manutenção a efetuar passa por cortar a parte danificada e colocar nessa zona uma nova placa de material compósito são. Unem-se as duas superfícies recorrendo as técnicas tradicionais de moldação manual.

A gama de modelos CompoBus apresenta uma grande resistência ao fenómenos corrosivos, uma vantagem quando se pretende operar em meios muito salinos e propensos a provocar a corrosão de materiais metálicos.



Figura 3 Aspeto da carroçaria do autocarro figura retirada de [6]

1.1.3. Proterra LLC – EcoRide BE35

A empresa Proterra LLC sediada na região do Colorado nos Estados Unidos da América colocou no mercado a partir de 2008 o autocarro EcoRide BE35 [7]. Este autocarro apresenta um piso rebaixado e possui uma motorização elétrica, sendo a energia necessária para o acionamento do motor armazenada em baterias recarregáveis, sendo possível adaptar o conceito deste modelo e utilizar um motor diesel, a gás propano, CNG, ou a gasolina de forma a gerar corrente para fazer funcionar o motor elétrico. Relativamente às suas dimensões e capacidade este autocarro apresenta um comprimento de 35 pés (aproximadamente 10.67 metros) e tem capacidade de transporte de um total de 68 passageiros dos quais 37 vão comodamente sentados e 31 vão em pé.

Construtivamente este autocarro é formado por um chassi convencional, adaptado para acomodar as baterias responsáveis pelo armazenamento de energia para o motor elétrico, sobre o qual é colocada uma carroçaria em materiais compósitos. Esta carroçaria é realizada por um processo de moldação por transferência de resina (VARTM) que é uma variante ao processo de RTM.

Para justificar o desenvolvimento deste novo paradigma de carroçaria a empresa aponta as seguintes vantagens:

- Redução significativa das emissões poluentes;
- Aumentar o número de passageiros que é possível transportar;
- Redução de peso da estrutura entre 20 a 40 % representado portanto uma redução bastante significativa de peso em relação a uma estrutura tradicional equivalente;
- De acordo com o fabricante, uma carroçaria em materiais compósitos permite aumentar a vida de um autocarro em 40 % uma vez que a estrutura não será afetada pelas condicionantes atmosféricas, sal ou outros agentes de origem química;

- Apresenta uma manutenção em caso de acidente que é significativamente mais fácil e barata (cerca de 90% de acordo com a referência do fabricante) que a equivalente efetuada em carroçarias realizadas em materiais metálicos;
- Com a utilização de materiais compósitos, devido as suas propriedades específicas é possível aumentar a resistência específica da estrutura.



Figura 4 Análise estrutural realizada para aprovação do veículo (figura retirada de [7])



Figura 5 Molde da carroçaria do EcoRide BE35 (figura retirada de [7])



Figura 6 Carroçaria em fase final de acabamento (figura retirada de [7])



Figura 7 Autocarro montado em fase final de montagem e acabamento (figura retirada de [7])



Figura 8 Autocarro em circulação na região do Colorado USA (figura retirada de [7])

1.1.4. Mobile Energy Solutions LLC – Hybrid electric bus

Data de 2004 a entrada no mercado do Hybrid electric bus fabricado pela empresa Mobile Energy Solutions. Este autocarro foi considerado o pai da geração dos autocarros “verdes”, pois possui uma motorização híbrida que conjuga o habitual motor de combustão interna a *diesel* com um motor elétrico. Possui uma lotação

para 37 pessoas sendo a estrutura realizada em materiais compósitos recorrendo-se para tal a um processo de infusão. De acordo com Phil Sweesy [8], a estrutura em materiais compósitos funcionará como chassi e carroçaria.

A estrutura é construída em 2 secções que posteriormente são ligadas por meio de adesivos estruturais. Relativamente aos materiais utilizados verifica-se a utilização de uma resina de vinilester e de uma fibra de vidro do tipo E. Para o compartimento do motor e para o piso aonde se encontram alojadas as baterias do sistema híbrido utilizou-se ainda um núcleo de madeira de balsa de forma a conferir uma maior rigidez á estrutura. De forma similar nas zonas de ancoragem das suspensões, o tecido de fibra de vidro foi substituído por outro em fibra de carbono.



Figura 9 Autocarro Hybrid electric bus (figura retirada de [8])

1.1.5. Projetos ainda em fase de desenvolvimento

Para além dos projetos já citados existem pelo menos mais dois em fase adiantada de estudo.

1.1.5.1. HCV - Hybrid Commercial Vehicle

Este projeto é uma iniciativa FP7 sendo financiado pela comunidade europeia. Com o desenvolvimento deste projeto pretende-se obter uma significativa redução da emissão de gases de efeito de estufa nas regiões urbanas. Como é do conhecimento geral em ambientes urbanos existe um preocupante aumento da concentração de gases poluentes, sabendo-se que uma parte significativa tem origem nos veículos de transporte coletivo. Ora o que este projeto pretende é uma hibridização dos referidos veículos de forma a reduzir em grande medida as substâncias emitidas. Híbridos elétricos têm mostrado até agora um grande potencial, porém o sucesso comercial é fortemente dependente da relação custo benefício.

O projeto do HCV tem como objetivo reduzir ainda mais o consumo de combustível e diminuir o custo de um sistema híbrido. Para cumprir tais objetivos foram estabelecidos 5 subprojectos intermediários, sendo o subprojecto 4000 responsável pelo desenvolvimento de uma carroçaria.

Sub-Project 4000 - Hybrid bus demonstrator

Este subprojecto visa a produção de autocarro de 18 toneladas híbrido que permita:

- Um consumo de combustível em um ciclo de condução da cidade, pelo menos, 5% menor;
- Uma redução de peso de pelo menos 500 kg;
- Uma redução de pelo menos 40% do custo dos componentes de transmissão de potência do sistema híbrido desenvolvido;
- Aumento dirigibilidade e desempenho do veículo;
- Redução de ruído

Posteriormente serão recolhidos e analisados os dados de uso em ambiente real dos primeiros autocarros híbridos da segunda geração. Estes dados serão de entrada para o processo de definição de requisitos veículo.

O sistema de transmissão será projetado com foco na integração de componentes de chassis para maior fiabilidade do sistema e menor custo. Sistema de armazenamento de energia, sistema de acionamento elétrico, uma nova transmissão e auxiliares elétricos serão desenvolvidos e integrados.

Outra tarefa será a de reduzir o peso do autocarro de forma a economizar o consumo de combustível e / ou tornar possível o aumento da capacidade de transporte de passageiros. Este subprojecto engloba a produção de modelos de simulação de veículos, incluindo sistemas de transmissão, auxiliares e sistema de controlo.

A nova transmissão híbrida será testada em autocarros teste, incluindo o armazenamento de energia e motor elétrico, a fim de compreender o potencial total do sistema.

As diferentes tecnologias híbridas serão demonstrados em quatro veículos de quatro fabricantes em diferentes cidades da Europa e avaliados em situações reais de utilização.

O projeto é composto por 18 parceiros e inclui tanto os grandes fabricantes de veículos bem como institutos, universidades e empresas menores. De referir também que de acordo com a fonte consultada [9] o IDMEC é um dos parceiros deste projeto.

1.1.5.2. Litebus - Modular Lightweight Sandwich Bus Concept

O projeto Litebus [10] é um consórcio constituído por diversas empresas e universidades europeias.

A utilização de tecnologia de sandwiches de materiais compósitos está na génese do projeto deste veículo. Veículos de serviço público (autocarros) são considerados como alvos principais para a aplicação da construção em sanduíche, uma vez que, desempenham um papel importante na indústria de transporte em países industrializados e em desenvolvimento. O projeto proposto está focado no desenvolvimento de uma nova tecnologia para a fabricação de carroçarias para autocarros usando painéis sanduíche multimaterial.

A produção de carroçarias para autocarros é um nicho de mercado em comparação com o mercado de automóveis. Estima-se que existem mais de 500 000 autocarros que circulam nos países da UE sozinhos. A fim de manterem-se competitivos no mercado, os fabricantes de carroçarias terão de produzir produtos cada vez

mais atraentes e reduzir os custos de produção. Assim, terão de ser desenvolvidos novos conceitos com a utilização de novos materiais e métodos de fabrico.

O projeto tem como objetivo explorar os potenciais benefícios oferecidos pela utilização de sanduíches de materiais compósitos em autocarros de passageiros e servir de base para o estudo da viabilidade da utilização destes mesmos materiais em comboios, navios, camiões, carros, etc...

Com a implementação deste novo conceito de veículo será realizada uma comparação entre o ciclo de vida dos produtos atuais em aço e os novos produtos em compósitos desenvolvidos.

Os principais objetivos gerais do projeto são:

- Resolver o problema de redução de custos, de peso e produção de veículos de transporte terrestre através do desenvolvimento de uma tecnologia de autocarros de construção modular, usando painéis sanduíche multimaterial em vez de aço / alumínio;
- Elaborar metodologias de projeto que diminuam “lead time” de produção através da redução do número de componentes e integração funcional, e permitindo a desmontagem, reparação fácil e reciclagem;
- Desenvolver o transporte urbano de alta qualidade;
- Contribuir para a mudança de equilíbrio entre modos de transporte;
- Contribuir para a melhoria da segurança rodoviária;
- Contribuir para a melhoria da qualidade no sector dos transportes rodoviários.

Os resultados esperados no final do projeto são:

- Produção de um novo conceito de estrutura do veículo com base em materiais compósitos em sanduíche com uma integração funcional maior;
- Criação de um banco de dados de propriedades das sanduíches e de processos de fabricação;
- Desenvolvimento e teste de um sistema de vigilância de fibra ótica;
- Criação de um banco de dados sobre as propriedades adesivas estruturais adequadas para a ligação das estruturas sanduíche;
- Estudo do comportamento de colapso do material da sanduíche;
- Criação de modelos físicos para o estudo do comportamento estático e dinâmico de estruturas em sanduíche;
- Análise dos custos do ciclo de vida.

1.2. Dados da sinistralidade Rodoviária

Analisando os relatórios do observatório de segurança rodoviária do instituto da mobilidade e transportes terrestres [11] podemos verificar os números relativos aos acidentes rodoviários em Portugal, mas não é possível estabelecer qual o número ou percentagem de mortos e feridos resultantes de acidentes de capotamento envolvendo veículos pesados de passageiros.

1.O Autocarro

Tabela 1 Vítimas de acidentes de viação, por tipo de veículo retirado da referência [11]

2. Passageiros vítimas segundo a categoria de veículo

	Vítimas mortais		Feridos graves		Feridos leves		Total de vítimas	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
Veic. Ligeiros	122	84	430	336	9673	8517	10225	8937
Veic. Pesados	3	7	14	11	340	276	357	294
Velocípedes	0	0	3	3	18	23	21	26
Ciclomotores	3	1	16	11	285	281	304	293
Motociclos	0	0	0	1	26	6	26	7
Outros	4	9	46	41	458	425	508	475
N.D.	0	0	0	1	2	0	2	1
TOTAL	132	101	509	404	10802	9528	11443	10033

2012: Passageiros vítimas mortais e feridos graves por categoria de veículo (%)

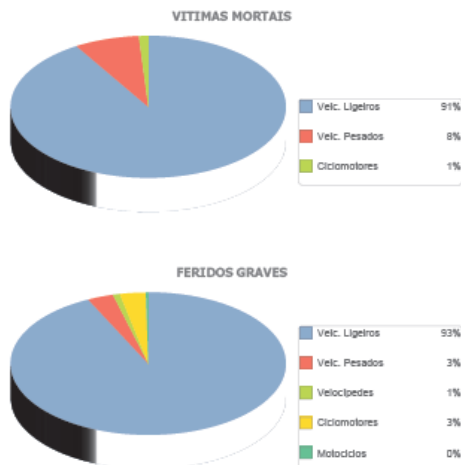


Tabela 2 Acidentes de viação e vítimas no continente, por natureza do acidente retirado da referência [11]

6. Acidentes e vítimas segundo a natureza do acidente

		Acidentes c/ vítimas		Vítimas mortais		Feridos graves		Feridos leves		Total de vítimas		Índice de gravidade	
		2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
Atropelamento	Atropelamento de peões	4961	4487	113	98	483	411	4774	4402	5370	4911	2,3	2,2
	Atropelamento de animais	73	55	1	0	2	0	79	66	82	66	1,4	0,0
	Atropelamento com fuga	382	311	4	8	29	21	365	298	398	327	1,0	2,6
	Total	5416	4853	118	106	514	432	5218	4766	5850	5304	2,2	2,2
Colisão	Colisão com fuga	379	321	6	3	18	12	427	365	451	380	1,6	0,9
	Colisão com outras situações	2129	2065	16	17	75	73	2716	2599	2807	2689	0,8	0,8
	Colisão frontal	2974	2638	109	92	406	323	4533	4088	5048	4503	3,7	3,5
	Colisão traseira com outro veículo em movimento	3248	2908	49	25	106	79	4370	3696	4525	3800	1,5	0,9
	Colisão lateral com outro veículo em movimento	5986	5641	73	53	342	299	7758	7163	8173	7515	1,2	0,9
	Colisão com veículo ou obstáculo na faixa de rodagem	1125	1030	19	14	62	36	1402	1310	1483	1360	1,7	1,4
	Colisão choque em cadeia	597	519	2	2	12	6	938	800	952	808	0,3	0,4
	Total	16438	15122	274	206	1021	828	22144	20021	23439	21055	1,7	1,4
Despiste	Despiste com dispositivo de retenção	893	905	14	13	44	55	1054	1054	1112	1122	1,6	1,4
	Despiste sem dispositivo de retenção	1264	1264	33	24	85	65	1377	1359	1495	1448	2,6	1,9
	Despiste com fuga	50	50	0	0	4	5	52	51	56	56	0,0	0,0
	Despiste simples	4270	3832	93	97	319	262	4794	4292	5206	4651	2,2	2,5
	Despiste com transposição do dispositivo de retenção lateral	293	257	19	11	32	35	331	312	382	358	6,5	4,3
	Despiste com capotamento	2392	2236	82	78	250	232	3029	2793	3361	3103	3,4	3,5
	Despiste com colisão com veículo imobil. ou obstáculo	1525	1348	56	38	167	146	1727	1542	1950	1726	3,7	2,8
	Total	10687	9892	297	261	901	800	12364	11403	13562	12464	2,8	2,6
TOTAL		32541	29867	689	573	2436	2060	39726	36190	42851	38823	2,1	1,9

Ao nível da UE foi possível verificar que anualmente são perdidas cerca de 40000 vidas ficando 1,7 milhões de pessoas incapacitadas em acidentes de viação, destes segundo a referência [12] cerca de 150 000 ficam incapacitadas e 150 morrem devido a acidentes envolvendo autocarros. Este valor representa um custo que pode ser estimado em cerca de 160 milhões de euros. Por isso verifica-se desde 1984 na União Europeia uma crescente preocupação em reduzir a sinistralidade rodoviária. Para isso foram criadas normas e regulamentos que obrigam os construtores de automóveis a melhorar a segurança passiva dos veículos e os países a melhorar a qualidade das suas infraestruturas rodoviárias. Paralelamente a este esforço foi também decidido a partir de 30 de Novembro de 1993 criar uma base de dados dos acidentes na união europeia de forma a perceber efetivamente o resultado das medidas que se estavam a implementar.

Esta base de dados tem o nome de CARE (Community Road Accident Database) contendo armazenadas as informações sobre todos os acidentes ocorridos no espaço da união europeia. A consulta da informação contida nesta base de dados é muito mais detalhada sobre cada um dos acidentes e o estado dos ocupantes das viaturas que a sua congénere nacional.

Analisando os dados desta base verifica-se que os acidentes aonde intervém autocarros e camiões são os menos representativos da sinistralidade rodoviária.

2. Materiais compósitos

Os materiais compósitos, frequentemente designados por compósitos, são materiais artificialmente produzidos ou que surgem na natureza, como é o caso da madeira, feitos a partir de dois ou mais materiais constituintes (fibra e resina) com propriedades físicas ou químicas significativamente diferentes, que permanecem separados e distintos no interior da estrutura acabada. Os dois materiais combinam-se ao nível macroscópico estabelecendo entre si uma interface reconhecida cujas propriedades não podem ser obtidas simplesmente pela soma dos diferentes materiais individualmente. Atualmente o conjunto de materiais que se adjetivam como compósitos é muito vasto e vai desde o vulgar betão armado até aos compósitos de elevado desempenho, como é o caso dos compósitos de carbono-epóxico.

Como constituintes destes materiais temos: o reforço, geralmente sob a forma de fibras ou partículas, que é o elemento resistente e que ocupa uma substancial fração volúmica do material (normalmente 20 % ou mais), a matriz, geralmente uma resina de epóxico ou de poliéster não-saturado que tem como função principal garantir a distribuição e transferência das tensões para a carga, para além disso, assegura a transferência de carga para o reforço e protege a superfície das fibras.

2.1 Reforço

Nesta secção referimo-nos somente às fibras uma vez que a fibra de vidro é o reforço utilizado no nosso trabalho.

As fibras apesar de apresentarem propriedades mecânicas muito superiores às dos materiais idênticos na sua forma maciça não são diretamente aplicáveis em aplicações de engenharia devido às reduzidas dimensões da secção transversal. No entanto, embebidas numa matriz, dão origem a compósitos fibrosos que são uma classe de materiais que permitem conceber estruturas de elevada resistência mecânica e assinalável leveza.

Foi demonstrado por Griffith que as fibras de vidro com 20 μm de diâmetro apresentavam tensões de rotura de 3500 MPa, sendo que o vidro na sua forma maciça apresentava tensões de rotura de 160 MPa.

Na seguinte tabela podemos ver uma comparação entre os materiais na sua forma convencional ou maciça e as fibras.

Tabela 3. Comparação de propriedades entre fibras e materiais na sua forma maciça/convencional. Tabela adaptada a partir dos apontamentos de A.G. Magalhães [13].

Material	Módulo de elasticidade (E) [GPa]	Resistência à tracção (σ_u) [GPa]	Densidade (ρ) [g/cm ³]	Módulo específico (E/ ρ)	Resistência específica (σ_u/ρ)
Fibras:					
Vidro E	72,4	3,5	2,54	28,5	1,38
Vidro S	85,5	4,6	2,48	34,5	1,85
Carbono (HM)	390	5,5	1,9	205	2,9
Boro	385	2,8	2,63	146	1,1
Sílica	72,4	5,8	2,19	33	2,65
Tungsténio	414	4,2	19,3	21	0,22
Berílio	240	1,3	1,83	131	0,71
Kevlar® 49	130	2,8	1,5	87	1,87
Materiais convencionais:					
Aço	210	0,34-2,1	7,8	26,9	0,043-0,27
Ligas de Al.	70	0,14-0,62	2,7	25,9	0,052-0,23
Vidro	70	0,7-2,1	2,5	28	0,28-0,84
Tungsténio	350	1,1-4,1	19,3	18,1	0,057-0,21
Berílio	300	0,7	1,83	164	0,38

2.1.1. Fibra de vidro

Uma vez que o material a utilizar no fabrico das carroçarias é essencialmente a fibra de vidro, decidimos fazer uma descrição sobre este material, onde é utilizado, como é feito e quais as suas principais propriedades.

2.1.1.1 Generalidades sobre a fibra de vidro

A fibra de vidro é o tipo de reforço mais utilizado. Sendo composto maioritariamente por: sílica (SiO₂), cal ou óxido de cálcio (CaO⁺), alumina (Al₂O₃), trióxido de Boro (B₂O₃) e óxido de magnésio (MgO). São fibras com diâmetro entre 3 a 20µm, de fácil fabricação e alta resistência, económicas (comparando com as fibras de carbono e as fibras aramídicas) e versáteis. É um compósito útil para aplicação em ambientes corrosivos cuja temperatura de serviço se encontra entre os 200°C e 300°C. É também uma boa isoladora elétrica. No entanto, tem baixa rigidez (não são normalmente utilizados na produção de peças para aviões ou pontes).

Exemplos de aplicações: carcaças de meios de transporte marítimo, tubagens em plástico, recipientes de armazenamento, instrumento musical (flauta), tanques (piscina, caixa d'água), barcos, material desportivo.

2.1.1.2 Processo de fabrico da fibra de vidro

O processo de manufatura para produção de fibra de vidro utilizada como reforço consiste em derreter gradualmente uma mistura de areia de sílica, calcário, caulinita, fluorite e outros minerais que formam assim o vidro fundido (temperatura de fusão de 1260°C) usando grandes fornalhas a uma temperatura de aproximadamente 1550°C. De seguida este é estirado através de uma fieira de platina-ródio com orifícios de dimensões muito precisas (5-25 micrómetros de diâmetro no caso de Vidro E e de 9 micrómetros para Vidro S) sendo que o diâmetro final do filamento é determinado pelo tamanho do orifício, temperatura e viscosidade da mistura, tempo de arrefecimento e velocidade da extrusão.

Estes filamentos são posteriormente revestidos por um revestimento têxtil para o fabrico de tecidos sem risco de danificação da fibra ou por um revestimento plástico para permitir a compatibilização da fibra com as matrizes. Este último revestimento contém geralmente: um ligante que mantém os filamentos unidos, um agente de adesão para facilitar a adesão fibra-matriz, um lubrificante e agentes anti estáticos ou de impregnação.

As fibras de vidro são também fortemente higroscópicas. Portanto, o revestimento tem também a função de impedir o contacto com a humidade evitando-se assim a destruição da interface fibra-matriz.

Fazendo variar a proporção dos materiais de base podemos obter diferentes tipos de fibra, por exemplo: E, S e R.

A fibra de vidro tipo E é feita a partir de um vidro de borosilicato com baixa quantidade de compostos alcalinos, que apresenta boas propriedades elétricas, mecânicas e químicas.

As fibras do tipo S e R são produzidas a partir de vidros de alta resistência e são muito aplicadas na indústria aeronáutica.

A resistência ao envelhecimento é função do teor alcalino. Portanto fibras com teores alcalinos inferiores a 14% apresentam alterações menos significativas em contacto com agentes atmosféricos ou químicos particularmente desfavoráveis. Como consequência, da resistência ao envelhecimento ser função do teor alcalino, a fibra do tipo A, fortemente alcalina foi sendo substituída progressivamente pela fibra do tipo E.

Tabela 4. Propriedades mecânicas das fibras de vidro E, S e R , tabela adaptada de [13]

Propriedade	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Densidade [g/cm ³]	2,6	2,49	2,55
Módulo de Young[GPa]	73,0	85,5	86,0
Tensão de rotura [MPa]	3400	4580	4400
Deformação na rotura [%]	4,4	5,3	5,2
Coefficiente de expansão térmica [10 ⁻⁶ /°C]	5,0	2,9	4,0

2.2. Matriz

A matriz tem como função transferir a carga para o reforço ou fibra no nosso caso, a matriz também assegura o posicionamento do reforço e protege as fibras do meio ambiente.

Embora os polímeros sejam o tipo de matriz mais usado em materiais compósitos cujo reforço seja uma fibra, também há matrizes de metais, carbono e cimento, por exemplo, mas uma vez que o nosso trabalho é sobre carroçarias de fibra de vidro para autocarros vamos apenas fazer referência a matrizes poliméricas. As matrizes poliméricas dividem-se em: termoplásticas e termoendurecíveis.

2.2.1. Matrizes termoplásticas

Os termoplásticos são polímeros, com estrutura linear, que se tornam moldáveis ou maleáveis acima de uma determinada temperatura porque as macromoléculas podem-se deslocar umas relativamente às outras, por estarem unidas entre si por forças intermoleculares (forças de Van Der Waals) e não por meio de ligações químicas. Quando se aquecem os polímeros termoplásticos estas ligações são temporariamente quebradas e passa a existir mobilidade molecular de forma a modelarem-se novas posições, são portanto moldáveis a quente. Com o arrefecimento posterior as moléculas “congelam” nestas novas posições entretanto alcançadas, restabelecendo-se as ligações químicas primitivas. Este processo é reversível, o que significa que os termoplásticos podem ser aquecidos e arrefecidos, processados e reprocessados as vezes necessárias sem perda das suas características. Diferem assim dos termoendurecíveis que formam uma ligação química irreversível durante o processo de cura, os termoendurecíveis quebram as ligações ao passar para o estado líquido, quando aquecidos, e estas ligações não se restabelecem após o arrefecimento. Esta qualidade dos termoplásticos significa também que são recicláveis, o que constitui um ponto importante nos dias de hoje.

Os termoplásticos são facilmente adaptáveis aos processos mais comuns de fabrico, como a moldação por injeção ou a termoformação.

Têm, relativamente aos termoendurecíveis, uma maior resistência ao impacto, maior tenacidade e bastante menor higroscopicidade mas não suportam elevadas temperaturas.

2.2.2. Matrizes termoendurecíveis

Os termoendurecíveis são polímeros em que as moléculas estão unidas por forças macromoleculares tal como os termoplásticos mas também por ligações químicas formando assim estruturas tridimensionais bastante rígidas. Estas estruturas fornecem certas propriedades aos termoendurecíveis como excelentes propriedades mecânicas e uma grande resistência a solventes e a temperaturas elevadas.

As matrizes termoendurecíveis são fornecidas para processamento sob a forma de uma mistura de dois ou três componentes: resina, acelerador e catalisador. Quando utilizadas resinas de epóxido temos uma mistura de 2 componentes, uma resina e um endurecedor. Misturando estes componentes na proporção adequada, dá-se a polimerização e a constituição da estrutura tridimensional, num processo que se designa habitualmente por “cura”. Algumas resinas requerem a aplicação adicional de calor e pressão para se efetuar a cura. Noutras, porém, a cura ocorre à temperatura ambiente. Os termoendurecíveis, ao contrário dos termoplásticos, não

podem ser reprocessados. Uma vez aquecidos assumem uma forma permanente e embora sejam mais resistentes ao calor que os termoplásticos se forem reaquentados é provável que sejam destruídos.

Em seguida apresentamos uma comparação entre as propriedades dos termoendurecíveis e dos termoplásticos.

Tabela 5. Comparação de propriedades entre termoendurecíveis e termoplásticos retirado de [13]

Propriedade	Termoendurecíveis	Termoplásticos
Custo	Superior	Inferior
Resistência à temperatura	Superior	Inferior
Rigidez	Superior	Inferior
Resistência	Superior	Inferior
Tenacidade	Inferior	Superior
Vida à fadiga	Superior	Inferior
Resistência química	Inferior	Superior
Viscosidade	Superior	Inferior
Reciclável	Não	Sim

Analisando esta tabela verificamos que as matrizes termoendurecíveis serão mais adequadas para a nossa aplicação, já que a vida a fadiga, a resistência á temperatura, a rigidez e a resistência mecânica são superiores.

Tendo em mente a conclusão tirada no parágrafo anterior fazemos então referência a várias matrizes termoendurecíveis.

Nas matrizes termoendurecíveis temos, para aplicações não estruturais e semi-estruturais: poliésteres insaturados, as resinas de viniléster e as resinas fenólicas. Para compósitos avançados de alta resistência temos: os epóxidos, as bismaleimidas e as poliimidas.

2.2.2.1 Tipos de resina

2.2.2.1.1 Poliésteres insaturados

As resinas de poliéster podem ser saturadas ou insaturadas.

As resinas de poliéster insaturado são as resinas mais comumente usadas na indústria de materiais compósitos devido ao seu baixo custo, facilidade de processamento e bom compromisso entre propriedades mecânicas, eléctricas e químicas. Os poliésteres insaturados dividem-se em três grandes grupos:

- As resinas ortoftálicas, que têm aplicação geral;
- As resinas isoftálicas, que se distinguem por possuírem boa resistência térmica e que são aplicadas em meios levemente agressivos;
- As resinas bisfenólicas, usadas em meios particularmente agressivos sobretudo com características ácidas.

2.2.2.1.2 Viniléster

O viniléster é um termoendurecível que é produzido fazendo reagir um epóxido com um ácido insaturado. Apresentam excelente resistência química, elevada tensão de rotura, baixa viscosidade e á temperatura ambiente o processo de cura é rápido. A principal desvantagem desta resina é apresentar uma elevada contração volumétrica, que pode atingir os 10 %. Estas resinas foram especificamente desenvolvidas para o fabrico de compósitos com aplicações em ambientes corrosivos, sendo por isso bastante utilizadas no fabrico de tubos e tanques para a indústria química.

2.2.2.1.3 Epóxido

As resinas de epóxido são as matrizes, que apresentam as melhores propriedades mecânicas, de resistência à degradação ambiental e tolerância à temperatura.

As principais vantagens em termos de propriedades desta matriz são: elevada resistência mecânica, grande resistência à abrasão, boa resistência química (sobretudo em meios alcalinos), boas propriedades de adesão à fibra, processo de cura sem libertação de voláteis, grande estabilidade dimensional em resultado da sua baixa contração (2 a 3%), baixa absorção de água e temperaturas de funcionamento tipicamente entre 100 e 220°C.

As principais desvantagens desta matriz são: as formulações de base são algo frágeis (embora esta deficiência seja facilmente colmatada através de aditivos de alta tenacidade, tais como alguns termoplásticos como o ABS e borrachas CTBN). O custo destas resinas é cerca de 4 vezes superior ao preço das resinas de poliéster e cerca de 2 vezes o custo das resinas de vinilester insaturado.

Os epóxidos são geralmente utilizados em aplicações de aeronáutica e de desporto.

2.3. Cargas

Os materiais compósitos para além do reforço e da matriz, são constituídos por cargas e outros aditivos que são adicionados com o objetivo de produzir vários efeitos como a diminuição do preço, facilidade de manuseamento, melhoria das características de moldação, melhoria das propriedades pós-cura e introdução de motivos decorativos.

As cargas mais comuns são obtidas a partir de depósitos naturais como por exemplo: mica, feldspato, sílica, quartzo, argila ou cálcio. Têm como principal função diminuir o preço do compósito. As principais

características devem ser a boa dispersabilidade, estabilidade de suspensão, baixa densidade, cor clara, baixa percentagem de humidade, baixa absorção de óleo, resistência ao calor e resistência química.

2.4. Aditivos

Frequentemente utilizam-se aditivos, para obter uma melhoria de certas propriedades específicas, cujas funções são a diminuição da contração da matriz durante o processo de cura, melhoria da resistência ao fogo, diminuição da emissão de voláteis, supressão da emissão de estireno, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar no ambiente de trabalho, condutibilidade elétrica, melhoria da tenacidade, estabilizadores de ultravioletas (UV), coloração e efeitos anti estáticos.

3. Processos de fabrico

Há muitos processos de fabrico associados à fabricação de materiais compósitos, os mais importantes são:

- Moldação por contacto;
- Moldação por vácuo;
- Moldação por compressão;
- Moldação por injeção;
- Autoclave;
- Enrolamento filamentar;
- Pultrusão;
- Centrifugação;
- Moldação em contínuo;
- Injeção de termoplásticos reforçados.

Dentro destes há vários que servem para fabricar materiais compósitos reforçados por fibras, sendo que a escolha do processo se baseia nos parâmetros pretendidos para a aplicação final. De todos estes processos apenas vamos referir aqueles que pensamos serem os mais indicados para a produção de uma carroçaria de um autocarro.

3.1. Moldação por Vácuo

O processo de moldação com o auxílio de vácuo é realizado no interior de um molde ou de um saco de vácuo consistindo de uma forma simplificada na seguinte sucessão de acontecimentos.

1. Aplicar desmoldante ao molde;
2. Aplicar uma camada de gel-coat para dar cor e para “esconder” as fibras,
3. Aplicar camada de reforço geralmente na forma de pré-impregnado;
4. Colocar um filme para facilitar a separação da peça;
5. Colocar um filme perfurado para comprimir a peça facilitando a saída do ar;
6. Colocar uma camada para absorver os eventuais excessos de resina;
7. Pôr um vedante para facilitar a selagem do conjunto;
8. Colocar um filme plástico ligado a uma bomba de vácuo;
9. Aplicar vácuo (0,15 até 1 bar) e temperaturas de cura abaixo de 170º C.

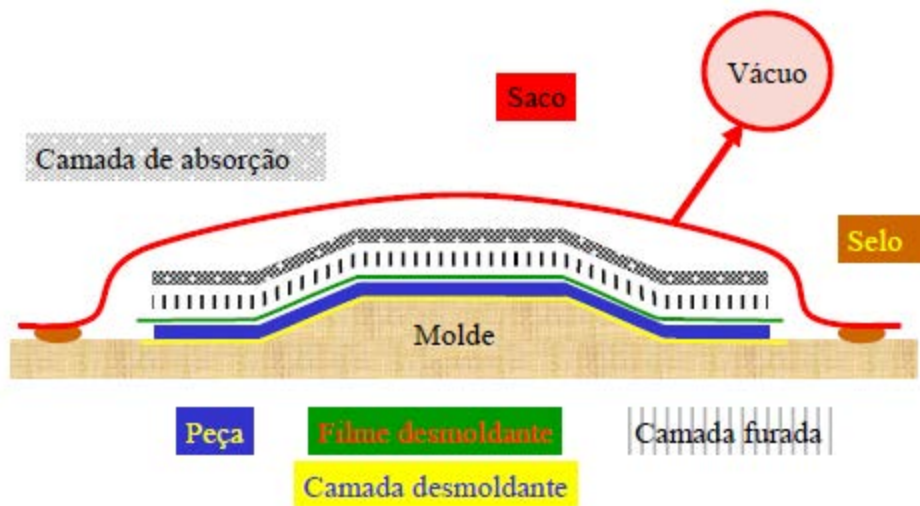


Figura 10. Esquema do processo de moldação por vácuo, figura retirada de [13]

Em seguida serão apresentadas as vantagens e desvantagens deste processo:

Tabela 6. Vantagens e desvantagens do processo de moldação por vácuo

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • A aplicação de vácuo compacta a pré-forma e ajuda a resina a penetrar e molhar uniformemente as fibras; • Ajuda a eliminar materiais ou gases em excesso contidos na resina não curada; • Permite a obtenção de peças de grande dimensões; • Peças com elevada qualidade, isto é, com maior homogeneidade, com menor conteúdo de poros e com maior conteúdo de fibra (que pode atingir os 70%) do que na moldação manual; • Menores problemas associados com a saúde dos operários dada a inexistência de resina líquida (menor conteúdo em voláteis); • Processo limpo e relativamente económico em equipamento directo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Preço relativamente elevado dos pré-impregnados e do seu armazenamento; • Despesas avultadas em material não recuperável (filme desmoldante, material de absorção, saco, etc.); • Necessita de equipamento auxiliar (arcas frigoríficas para armazenamento dos pré-impregnados, estufa ou autoclave) dispendioso; • Dificuldade em aplicar vácuo no caso de peças complexas; • Exige mão-de-obra especializada.

3.2. Moldação por Injecção

No processo de moldação por injeção é possível uma grande variedade de processos como os que citamos agora:

- VRI - Vacuum Resin Infusion;

- VIP = Vacuum Infusion Process;
- VARTM = Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding;
- RI = Resin Infusion;
- RIFT = Resin infusion under flexible tooling;
- SCRIMP = Seeman Composites Resin Infusion Moulding Process;
- CVI - Controlled Vacuum Infusion;
- RTM- Resin Tranfer Molding;
- SRIM- Strutural Reaction Injection Molding;

Dos processos anteriormente referidos vamos prestar particular atenção á análise dos processos de RTM, SRIM e SCRIMP.

3.2.1. RTM

Nesta variante específica do processo de moldação com injeção de resina, o reforço que normalmente é uma pré-forma ou um tecido, é previamente inserido num molde onde posteriormente é injetada a resina sob baixa pressão. A resina impregna de uma forma progressiva o reforço promovendo a expulsão do ar do interior do molde. Após a cura da resina obtém-se a peça em compósito.

Seguidamente apresentamos um quadro comparativo entre as principais vantagens e desvantagens deste processo.

Tabela 7. Vantagens e desvantagens do processo de RTM.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Como é realizada uma injeção automática de resina num molde fechado existe uma reduzida libertação de vapores de estireno para o meio ambiente; • Utiliza pressões de injeção mais baixas em relação á moldação por compressão; • Origina peças com excelentes características mecânicas uma vez que existe uma grande percentagem de reforço na peça; • Permite a obtenção de peças em que as duas superfícies têm excelente acabamento superficial; • Processo que se adequa á produção de peças com grande profundidade e com formas complexas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para a produção de peças complexas é necessário realizar diversas simulações para garantir que todas as extremidades da peça se encontram impregnadas; • É necessário produzir molde o que nem sempre é fácil ou economicamente viável; • Exige que sejam feitos investimentos de maior vulto que os processos de moldação por contacto ou vácuo.

3.2.2. SRIM (Structural Reaction Injection Molding)

Genericamente esta variante é similar ao processo de RTM só que em vez de ser injetada uma resina, é injetada uma mistura de duas resinas que vão reagir quimicamente uma com a outra, ocorrendo o processo de cura. Estas duas resinas são misturadas numa câmara antes de serem injetadas no molde. Para este processo recorre-se usualmente ao uso de um reforço em fibra de vidro e uma resina que apresente baixa viscosidade.

Com a utilização deste processo produtivo, existe uma poupança de tempo em relação ao processo de RTM pois verifica-se que o SRIM apresenta um tempo de cura da resina muito mais baixo. A rápida mistura dos dois componentes acelera o processo de polimerização, tornando desnecessário o aquecimento do molde para acelerar o processo de cura.

Se adicionarmos fibras curtas ou trituradas a um dos componentes da resina em vez de se introduzir no molde uma pré-forma, temos outra variante do processo de moldação por injeção de resina designado por RRIM(Reinforced Reaction Injection Molding).

3.2.3. Processo de moldação de compósito por infusão de resina de Seemann (SCRIMP)

O processo de moldação por infusão de resina de Seemann, ou SCRIMP (“Seemann composite resin infusion molding process”) é outra das variantes possíveis ao processo de RTM sendo representado esquematicamente na seguinte figura. Essa técnica foi desenvolvida e patenteada por William Seemann [14], e utiliza somente a pressão de vácuo para infusão da resina. Esta técnica difere do processo de RTM e de VARTM, que são realizados com o auxílio de molde dos dois lados, enquanto esta técnica utiliza apenas molde de um lado da peça.

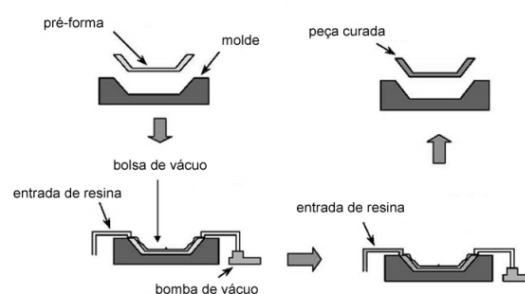


Figura 11 Representação esquemática do processo de SCRIMP, figura retirada de [15]

A próxima figura demonstra o esquema típico para a realização de SCRIMP. A pré-forma é posicionada no molde previamente recoberto por um agente desmoldante. Acima da pré-forma, coloca-se uma camada de um material fino e poroso (“peel ply”) que não adere à resina, para facilitar a desmoldagem da peça após o processamento. Em seguida, coloca-se um material de alta permeabilidade que aumenta a velocidade do fluxo de resina através da superfície e, simultaneamente, permite o fluxo na direção transversal da pré-forma. Por último, coloca-se a bolsa de vácuo que é selada com fita selante.

Pelo menos duas mangueiras são posicionadas entre o molde e a saco de vácuo, uma é conectada à bomba de vácuo e a outra é posicionada no recipiente que contém a resina.

Quando a pressão de vácuo é aplicada, a pré-forma é compactada gerando-se um gradiente de pressão no interior do sistema, permitindo assim a infusão da resina.

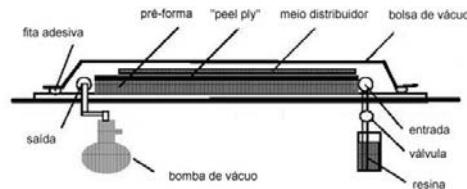


Figura 12 Esquema da montagem para a realização de SCRIMP, figura retirada de [15]

A pressão de injeção é igual à pressão atmosférica e a pressão de vácuo é limitada pela pressão de vapor das substâncias voláteis da resina utilizada. No caso da resina éster-vinílica a pressão de vapor é limitada pela pressão de vapor do estireno que é igual a 10 kPa a 40° C.

A principal vantagem do processo de SCRIMP, comparado com o processo de RTM, é a necessidade de apenas um molde, não necessitando de um contra-molde o que possibilita uma redução do investimento inicial. As peças processadas por SCRIMP possuem boa qualidade e alta fração volumétrica de fibras. Outra das vantagens deste processo é a sua baixa emissão de voláteis durante o processamento.

A desvantagem dessa técnica prende-se com a dificuldade de automatização. Além disso, o lado da peça moldado pelo saco de vácuo não tem bom acabamento superficial, e a espessura da peça não é constante devido à compactação não-uniforme da pré-forma.

Recentemente, HEIDER et al. [16] obtiveram uma melhoria da qualidade superficial da superfície da peça com a adição de uma placa semirrígida sob o saco de vácuo. AMOUROUX [17] aumentou a repetibilidade e reduziu o gradiente da espessura com a utilização de uma membrana permeável ao ar, mas impermeável à resina.

3.3. Autoclave

Neste processo o pré-impregnado é cortado e empilhado sobre o molde na sequência pretendida. Todo o conjunto é inserido num saco de vácuo e submetido a um ciclo de pressão e temperatura pré-definido. Nesta figura constata-se que o laminado está inserido entre duas películas de Teflon® poroso, que permitem o escoamento do excesso de resina ao mesmo tempo que facilitam a desmoldagem. O excesso de resina é retido no tecido absorvente, colocado por cima das placas de moldação. Finalmente temos o tecido homogeneizador de vácuo para promover a uniformização deste a toda a placa, evitando a "colagem" do saco. Todo este conjunto está coberto por uma película de Nylon®, saco de vácuo, cuja vedação é garantida por tiras de silicone.

A qualidade do processo de cura da resina vai depender essencialmente de três parâmetros dos quais seguidamente fazemos referência:

- Temperatura;
- Vácuo;
- Pressão.

Seguidamente expomos as principais vantagens e desvantagens deste processo:

Tabela 8. Vantagens e desvantagens do processo de centrifugação.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Para resinas termoendurecíveis a utilização da autoclave e as elevadas temperaturas existentes aceleram o processo de cura; • Para peças de elevada espessura a utilização de altas pressões permite obter laminados com um menor teor de vazios; • Como é utilizado vácuo as peças não têm tendência a apresentar excessos de resina. • Permite a obtenção de peças com muito boas características mecânicas e que apresentam muito boa qualidade de acabamento superficial; • Dependendo do tamanho das peças e da autoclave permite a produção de muitas peças em simultâneo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita de equipamento que é dispendioso; • Para peças complexas e com raios de curvatura muito pequenos existe alguma dificuldade de aplicar o vácuo de forma eficaz; • Exige mão-de-obra qualificada no controlo do processo; • Apesar da sofisticação dos meios envolvidos o processo de cura ainda é relativamente demorado.

3.4. Centrifugação

Na centrifugação o reforço e a resina são introduzidos num molde cilíndrico de revolução (revolução sobre o seu próprio eixo). Este molde depois de introduzidos o reforço e a resina vai rodar a altas velocidades enquanto se dá o aquecimento. A força centrífuga gerada ajuda a distribuir a resina pelo reforço criando uma boa superfície tanto no interior como no exterior da peça obtida. A peça é removida do molde quando o processo termina ou seja quando o molde para de rodar.

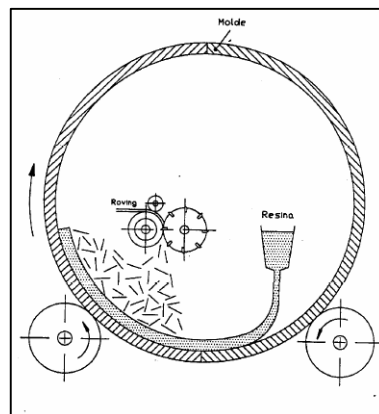


Figura 13. Esquema do processo de centrifugação, figura retirada de [13]

Alguns produtos feitos através da centrifugação são: postes, tubos e tanques.

Este processo é automatizado o que pode levar a um ritmo de produção elevado. As propriedades mecânicas obtidas neste processo são geralmente, mais baixas que as obtidas por enrolamento filamental.

Apresentamos seguidamente, através de uma tabela, as vantagens e desvantagens deste processo:

Tabela 9. Vantagens e desvantagens do processo de centrifugação.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Devido à força centrífuga consegue-se a aplicação e manutenção <i>in-situ</i> do reforço; • Devido, também, à força centrífuga consegue-se a repartição da resina e eliminação das bolhas no compósito; • A força centrífuga também provoca uma elevada pressão que permite obter uma elevada percentagem de reforço; • Duas faces lisas através do uso de gelcoat; • Boa reprodutibilidade • Controlo do compósito durante o fabrico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessita de um investimento inicial elevado; • Limitado a produzir peças com forma cilíndrica ou cilíndrico-cónica; • Necessita de mão-de-obra qualificada; • Necessidade de grande precisão no balanceamento do molde.

3.5. Enrolamento filamental

A técnica de enrolamento filamental de materiais compósitos é utilizada há bastantes anos para a produção de tubagens. O processo admite duas variantes que passamos a explicar:

• **Enrolamento Circunferencial** alternado com reforço longitudinal. Este tipo de enrolamento permite a obtenção de um laminado com múltiplas camadas unidireccionais perpendiculares.

• **Enrolamento Helicoidal Cruzado**, esta tipologia de enrolamento permite a obtenção de peças com bandas unidireccionais de filamentos com maior ou menor grau de entrecruzamento das fibras.

Para definir o grau de entrecruzamento das fibras usa-se a seguinte equação em que α é o ângulo de enrolamento em relação ao eixo de rotação da peça, D é o diâmetro da peça que se pretende produzir, N é um número adimensional que define o grau de entrecruzamento, ou seja o número mínimo de passagens a efetuar para encher o molde e L é a largura da peça fabricar.

$$\tan \alpha = \frac{\pi * D}{N * L} (eq. 1)$$

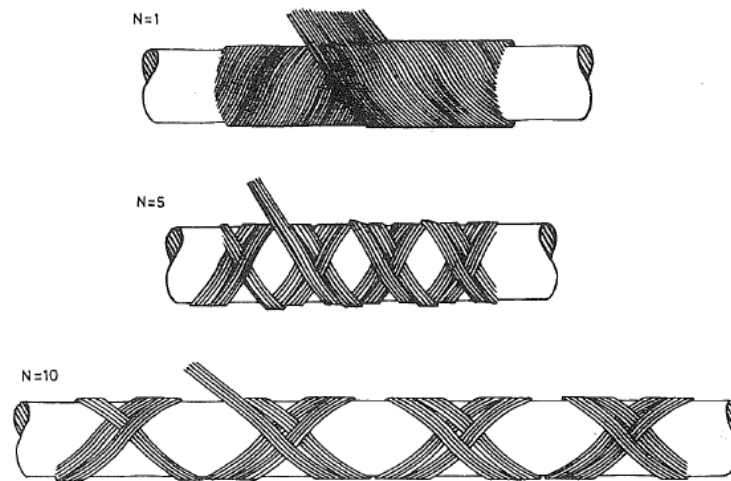


Figura 14 Configurações do enrolamento helicoidal com diversos graus de entrecruzamento, Figura retirada da referência [18]

Da análise da equação anterior podemos concluir que existem muitos graus de entrecruzamento possíveis para a produção de uma mesma peça.

Para além da questão do entrecruzamento, também se verificou que só é possível estabelecer um modelo contínuo para peças que apresentem superfícies suaves e que não possuam furos ou insertos, o padrão de entrecruzamento será então regular.

Com a evolução tecnológica o processo de enrolamento evoluiu muito rapidamente deixando de ser um técnica simples passando a impor dificuldades relevantes que ao longo dos anos foram sendo resolvidas.

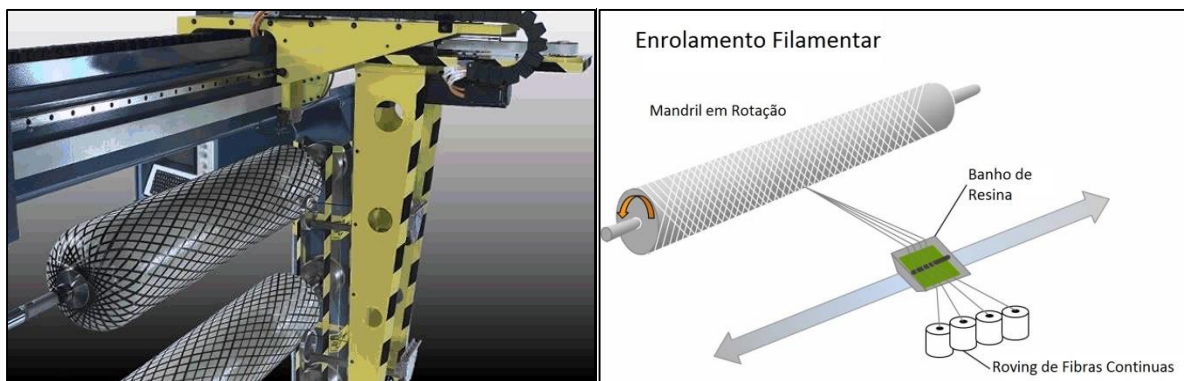


Figura 15. Exemplo ilustrativo do funcionamento do processo de enrolamento filamentar, figura retirada de [13]

3.5.1. Considerações de Projeto

Para se proceder ao projeto de estruturas em materiais compósitos, nomeadamente aqueles que são obtidos por enrolamento filamentar é importante consultar a obra de S. T. Peters e outros [19]. Ao longo da obra os autores refletem sobre quais são os principais parâmetros a ter em consideração para o correto projeto de estruturas. Os autores referem primeiramente que devem ser minimizadas todas as operações que obriguem a maquinaria da estrutura, devendo-se para evitar esta situação, usar insertos metálicos *in-situ* na própria operação de enrolamento. Na fase de projeto, o projetista deve ainda ter uma particular atenção em reduzir o número de componentes necessários para a elaboração da estrutura, promovendo na medida do que seja possível uma co-cura de ligação e a construção de elementos para aumento da rigidez do conjunto.

De uma forma genérica, o projetista deve ser capaz de aproveitar toda a flexibilidade que o processo de enrolamento filamentar permite.

Para este processo verifica-se que ainda não existe uma definição pré-determinada da espessura de cada camada, resultando esta espessura de uma função que engloba a largura de banda de filamentos, o tamanho da sua secção, o teor de resina utilizado, do número de filamentos no fio e do número de fios utilizados no enrolamento.

Pela bibliografia consultada, podemos verificar que existem inúmeros programas, como o ESACOMP®, que na sua forma original foram concebidos para estudar o comportamento e propriedades de laminados, mas também são capazes de resolver de forma satisfatória o problema para o caso de enrolamento filamentar, cabendo em última análise ao projetista comparar os resultados obtidos através de *software* com aqueles que seriam esperados.

Um outro facto que deve ser tido em conta no cálculo e projeto com materiais compósitos, é a necessidade de conceber novas soluções de raiz e nunca tentar concretizar um projeto que passe pela mera substituição dos componentes metálicos. Para uma situação como a nossa, em que é utilizado o enrolamento filamentar como meio de obtenção da estrutura esta regra assume ainda uma maior importância, uma vez que existe ainda a questão do ângulo de enrolamento. Se o projeto aconselhar ângulos de enrolamento muito baixos e tal conduzir a um grande entrelaçamento e escorregamento das fibras o projetista deve optar por uma solução que passe pela utilização de ângulos superiores, que apesar de apresentarem um custo e um peso superiores permitem simplificar grandemente o processo produtivo.

3.5.2. Considerações de produção

Da pesquisa que realizamos concluímos, que deve ser dada particular atenção as limitações de vida no pote da resina usada, e ao tempo durante a qual a resina estará exposta à atmosfera antes de se iniciar o processo de cura (out time). Estes fatores são de particular importância quando se pretende produzir elementos de grandes dimensões. Para peças de pequenas dimensões pode ser utilizada resina de cura rápida, pois não existe uma complicação do processo produtivo e permite uma redução dos custos do processo de enrolamento e uma diminuição do tempo de cura.

3.5.3. Processo produtivo

O processo produtivo utilizado deve ser sempre aquele que apresenta a melhor relação entre as suas vantagens e desvantagens. A título de exemplo para produzir um pequeno reservatório de baixas pressões como uma vulgar botija de gás, por enrolamento filamentar, a peça gerada vai apresentar uma superfície exterior com elevados níveis de rugosidade. Por outro lado se utilizarmos o processo de centrifugação, não conseguimos garantir uma impregnação uniforme da fibra. Para elementos de grande dimensões, como é o caso da carroçaria de um autocarro verifica-se que o processo de enrolamento filamentar é capaz de apresentar um custo que é quatro vezes inferior ao processo de impregnação manual, sendo menos de metade do custo da produção mais favorável por deposição automática de fibras.

3.5.3.1 Seleção do fio de fibra a utilizar

Relativamente a secção do fio utilizada no enrolamento filamentar deve-se optar, sempre que possível, por um fio que seja o maior possível desde que seja praticável para o produto a fabricar. Chegamos a esta conclusão porque as análises práticas efetuadas, ao longo dos anos, indicam que o uso de um fio com maior número de filamentos pode levar a uma poupança no custo do processo produtivo na ordem dos 40%. A utilização de fibras com fios de maiores dimensões tende a implicar uma redução do tempo de fabrico da peça, no entanto também se verificou que á medida que existe um aumento do tamanho do fio existe uma diminuição das propriedades mecânicas e físicas das fibras levando a que ocorra a produção de peças com piores características mecânicas e pior acabamento ao nível das suas superfícies.

3.5.3.2 Compactação e cura da resina

Para o processo de compactação e cura da resina, devemos optar sempre pelo processo que apresente a maior simplicidade e consiga garantir os requisitos especificados no caderno de encargos. Ou seja, se for viável deve-se optar pela utilização de um sistema constituído por uma fibra seca e uma resina molhada que vai impregnar por imersão ou rolamento a fibra. O uso de processos que necessitem da utilização de uma autoclave, devido aos seus altos custos devem ser evitados. Se for imprescindível a cura do elemento a fabricar em autoclave o projetista deve ter atenção ao fenómeno de encurvadura que ocorre sobre o eixo mais comprido da peça, que diminui grandemente as características estruturais do elemento. Para a situação que nos encontramos a estudar, pensamos que será possível optar por outros processos de cura, que não envolvam a utilização de autoclaves e que conduzam a bons resultados estruturais da estrutura produzida.

3.5.3.3 Design e conceção do mandril

Durante o processo de conceção de *design* de uma estrutura em materiais compósitos, deve-se evitar ter ideias pré-concebidas. Ou seja, não existe nenhuma razão estrutural ou de processo de fabrico, que impeça a

utilização em conjunto de materiais compósitos e materiais metálicos, pois é possível que desta sinergia resulte um produto melhor e que porventura apresenta um custo produtivo mais baixo.

Os mandris utilizados no processo de enrolamento filamentar podem ser realizados nos mais diversos materiais sendo os mais correntemente utilizados os seguintes:

- Aço;
- Madeira;
- Gesso;
- Areia aglomerada.

Mandris em aço ou madeira são dos mais tradicionalmente utilizados tendo como principal desvantagem, geralmente não poderem ser retirados do interior da peça após finalizado o processo de cura da resina. Assim se pretendermos utilizar um mandril deste tipo devemos ponderar muito bem se é viável o custo de produção de um novo mandril a cada peça que se pretenda fabricar e se valerá a pena do ponto de vista estrutural a existência de uma estrutura no interior da peça fabricada.

Mandris em gesso são facilmente implementáveis e têm uma alta taxa de reutilização da sua matéria-prima, pois podem ser facilmente removidos por pequenos orifícios e o gesso de que são feitos pode ser reutilizado.

Mandris realizados em areia aglomerada são facilmente removíveis do interior das peças em fabrico. Para tal apenas é preciso a existência de um pequeno orifício que permita a injeção de água em quantidade suficiente para a dissolução da areia. Este género de mandris permite a obtenção de peças com raios de curvatura inversos.

O caminho que a fibra tem de percorrer ao longo do enrolamento também pode sofrer uma alteração no sentido de permitir uma poupança de material ou de forma a permitir produzir alguma parte removível do componente em fabrico. Para tal efeito são geralmente utilizados pinos nos topos dos veios em vez de se realizar o enrolamento sobre as suas abóbadas. A utilização de pinos permite também evitar o fenómeno de escorregamento e entrelaçamento das fibras ao longo do mandril permitindo reduzir o custo com as aparas resultantes do processo.

Para a produção de elementos planos por enrolamento filamentar deve ser dada particular atenção ao fenómeno de acumulação no centro dessa superfície de fibra e resina, este fenómeno pode originar situações de encurvadura. Devemos ainda prestar uma atenção redobrada para evitar que a resina seja espremida resultando assim uma secagem parcial da peça.

3.5.3.4 Processo de Impregnação

Para realizar a impregnação da fibra podemos optar por dois processos distintos. Um processo passa pela impregnação do fio à medida que este está a ser enrolado. O outro processo passa pela impregnação e posterior gelificação dos fios de fibra permitindo posterior utilização formando-se assim os pré-impregnados. A técnica de enrolamento filamentar permite ainda que as fibras sejam enroladas sem estarem impregnadas ou com um baixo teor de impregnação, para que seja possível transferir o enrolamento para um outro molde, realizando-se neste caso uma moldação por transferência de resina (RTM). Este processo de impregnação de resina permite uma reconformação do componente para uma forma que seria de muito difícil obtenção por outro processo produtivo, assegurando simultaneamente um melhor acabamento superficial quando o molde é externo.

A capacidade apresentada pelo compósito em reconformar após a deposição das fibras, permite considerar o enrolamento filamental, o “fiber placement” e o RTM como técnicas válidas e complementares de fabrico para produção de muitas formas estruturais.

O processo de cura do compósito é normalmente realizado a temperaturas elevadas não havendo necessidade de recorrer a meios complementares de compactação. Os processos de extração do mandril, de corte, e outras operações de acabamento completam o processo produtivo.

Tal como já tivemos a oportunidade de ver, o enrolamento filamental tem a capacidade de admitir inúmeras adaptações sendo capaz de produzir as mais variadas estruturas como cilindros, canos, e reservatórios de alta e baixa pressão. Estas estruturas quando são realizadas com uma correta seleção e colocação de fibras e resinas resistem facilmente a carregamentos como pressão, compressão, flexão e torsão.

3.5.3.5 Seleção de materiais para o enrolamento filamental

Como já tivemos oportunidade de referir o enrolamento filamental permite a obtenção de peças para as mais diversas indústrias, realizadas com os mais diversos materiais substituindo assim elementos que tradicionalmente eram realizados com materiais metálicos.

As principais razões apontadas para a substituição de materiais metálicos por materiais compósitos de origem polimérica são:

- Os materiais compósitos são capazes de apresentar uma elevada resistência aos fenómenos corrosivos, o que pode ser uma grande vantagem se pretendermos trabalhar para as indústrias químicas, petrolíferas ou da construção naval;
- A fibra de vidro também garante um eficaz isolamento elétrico das estruturas;
- As fibras de carbono e as fibras aramídicas tem elevadas propriedades específicas o que pode ser uma vantagem na produção de elementos em que o peso final é importante;
- As fibras de aramidas e de polietileno de muito alto peso molecular apresentam uma grande tenacidade, o que pode ser importante se se pretender conceber equipamentos com elevada capacidade de absorção de energia e de proteção balística;
- As fibras de carbono conseguem apresentar uma estabilidade térmica que é valorizada quando se pretende conceber aplicações que exigem grande rigor geométrico e grandes variações de temperatura;
- Se forem pensadas de raiz e produzidas em massa, as peças em materiais compósitos feitas por enrolamento de filamentos permitem uma poupança económica significativa, sendo proporcional ao grau de sofisticação do produto a produzir;
- Com o uso de materiais compósitos é possível realizar poupanças muito significativas na recuperação/reconstrução de infraestruturas danificadas.

3.5.3.6 Considerações de forma

Por enrolamento filamentar é possível obter normalmente peças de forma cilíndrica, esférica ou com uma abóbada nos topos.

Este género de peças explora de uma forma eficiente o enrolamento rápido da fibra. Mas qualquer componente que disponha de um eixo de simetria e que não disponha de superfícies côncavas pode ser obtido por este processo.

As formas cilíndricas com abóbadas nas extremidades ou qualquer outra solução de inversão são as soluções ideais para o enrolamento filamentar, pois permitem que as máquinas façam uma deposição dos filamentos com uma tensão constante sobre toda a superfície da peça.

O raio de curvatura do enrolamento tem um papel muito importante no processo uma vez que leva a uma alteração da pressão no interface. Esta pressão é uma função direta da tensão aplicada ao filamento e inversa do raio de curvatura do mandril.

Para a situação da carroçaria que estamos a estudar deve ser analisado em pormenor este efeito nos cantos da secção, principalmente nos dois cantos superiores da viatura. A pressão realizada no interface fibra-matriz é muito influenciada pelo fluxo de resina provocando assim um ponto de compressão localizada. Quando se tratam de estruturas com grande fração volúmica de resina a fluir dos interstícios estas podem apresentar uma tensão de interface reduzida. Na atualidade, a grande maioria dos produtores considera que para ser obtido um laminado de melhores características é preferível manter uma certa tensão constante no enrolamento da fibra, resultando assim a produção de uma peça em que as fibras se encontram tracionadas mesmo após finalizado o processo de cura.

A tensão total instalada no interface sofre geralmente um aumento, com o aumento da pressão que se gera aquando do processo de cura se o mandril possuir um coeficiente de expansão térmica mais elevado que o reforço. Elevadas pressões no interface garantem a obtenção de um produto compacto em que a existência de vazios é minimizada.

Se o mandril apresentar uma superfície plana ou se o raio de curvatura for muito elevado deve ser fornecida uma pressão de compactação suplementar. Esta pressão suplementar pode ser realizada utilizando um autoclave, um saco de vácuo, uma tela retráctil, um molde externo ou uma cabeça de alimentação com o pé aquecido. Voltando novamente á situação que nos encontramos a analisar devemos prestar particular atenção ao enrolamento das partes planas e dos cantos procurando uma solução de compromisso entre ambas as situações, evitando o fenómeno de encurvadura das fibras nas superfícies planas ou quase planas.

Se os projetistas não tiverem as devidas preocupações, o enrolamento sobre mandris com superfícies côncavas vai originar peças com grande entrelaçamento das fibras, o que levará ao aparecimento de vazios e de filamentos não compactados. Para evitar esta situação, os filamentos devem ser obrigados a acomodar-se contra contornos negativos, sendo necessário mudar a tensão a que as fibras se encontram sujeitas durante o processo de enrolamento. Utilizando para tal rolos de compactação antes de cura, ou feita uma aplicação externa de pressão durante a cura. Outra técnica que pode ser utilizada e que apresenta excelentes resultados passa pela utilização de um saco realizado em material elastomérico que se expande durante o processo de cura aumentando a pressão sobre o mandril e obrigando as fibras a conformarem-se contra o mesmo.

Obviamente, que para uma situação em que o raio da concavidade é menor que a hiperboloide que seria produzida naturalmente para o ângulo de enrolamento helicoidal em causa e este for menor que o ângulo de

escorregamento para o enrolamento circunferencial, o enrolamento desta concavidade é perfeitamente possível mesmo sem recorrer a nenhuma manipulação externa do enrolamento.

3.5.3.7 Considerações sobre o tamanho das peças a produzir

O tamanho das peças a fabricar não se apresenta *a priori* como um fator limitativo da produção de elementos de grandes dimensões através de enrolamento filamentar. Para tal o mandril tem de ser corretamente concebido, devendo apresentar valores de deformação e inércia dentro do tolerável para a produção de peças com bom rigor dimensional. Da análise da próxima equação verifica-se que o componente a fabricar não é afetado estruturalmente quando submetido apenas a um carregamento puro sobre a sua membrana. Resultando uma tensão composta na direção circunferencial da seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{P \cdot R}{t} \text{ (eq.2)}$$

Em que σ representa uma tensão, P é a pressão interna a que o componente se encontra sujeito, r é o raio de curvatura e t é a espessura da parede do corpo a produzir. Como podemos constatar na expressão anterior não aparece nenhum termo que estabeleça uma relação, seja ela direta ou indireta entre o tamanho do corpo a produzir e a tensão a que este se encontra sujeito na direção circunferencial. Isto só é verdade se a rotura do elemento se der numa zona que não seja influenciada por carregamentos secundários (esforços na membrana e/ou flexão). Sendo assim a espessura, só interfere com a resistência estrutural da peça necessitando por isso de analisada se for superior a um décimo do seu diâmetro. Estes efeitos caracterizam-se por uma distribuição não uniforme do carregamento ao longo da espessura da parede, em consequência dos materiais compósitos terem um módulo de elasticidade baixo na direção da espessura.

3.5.4. Configurações do enrolamento

O enrolamento filamentar recorre normalmente a formas curvas ou circulares, sendo estas enroladas em diversos tipos de mandris tendo a particularidade de se formarem peças ocas. No entanto hoje já é possível realizar peças com novas configurações nomeadamente cones, tubos de secção quadrada ou retangular, volantes de inércia ou isogrelhas.

3.5.4.1 Forma cilíndrica com abobadas

Tipicamente esta configuração é utilizada na produção de recipientes pressurizados e motores de foguetes. A conceção e escolha dos padrões do enrolamento e das formas das abóbadas deve sofrer particular atenção da parte do departamento de projeto para que sejam evitadas situações aonde ocorre o escorregamento da fibra sobre o mandril. Tipicamente as abóbadas resultantes do processo de enrolamento devem ser isotensoídes, levando a que seja necessário um esforço de cálculo e simulação prévio ou processo de produção

dos mandris. Vulgarmente ao nível da indústria são utilizadas dois tipos diferentes de abóbadas. As abóbadas do tipo geodésico que permitem que a tensão instalada na peça seja constante ao longo da abóbada e as abóbadas do tipo polar. Qualquer uma destas formas implica uma derivação própria do processo de enrolamento filamentar.

No entanto, as únicas variáveis que ao nível da geometria afetam a forma da abóbada são o raio do cilindro, R , o raio ao centro da banda de enrolamento na abertura polar, R_e , e a espessura do reforço longitudinal. Havendo ainda muitas outras considerações a ter em conta no enrolamento: os padrões devem ser estáveis, a abóbada deve ser concebida de forma a apresentar uma abertura que permita a correta remoção do mandril e devendo ainda existir um campo equilibrado de tensões na secção cilíndrica.

3.5.4.2 Forma esférica

As formas esféricas apresentam como principal vantagem a possibilidade de ter o maior volume possível para uma determinada área superficial. Assim sendo são utilizadas para produzir de reservatórios sujeitos a elevadas pressões internas, sejam eles reservatórios em materiais compósitos ou em materiais metálicos. Para uma situação em que é realizado um enrolamento filamentar de uma forma esférica, o raio de curvatura é constituído segundo todas as direções. A melhor opção de reforço é uma combinação de ângulos de enrolamento da qual resultem laminados isotrópicos (no plano tangente). Este padrão é obtido fazendo um enrolamento em série de grandes círculos em que cada um se desvia do seu antecessor uma distância que é equivalente a uma largura de banda.

3.5.4.3 Formas Cilíndricas e veios

Elementos com estas formas podem ser enrolados utilizando um mandril cilíndrico desde que esteja assegurada a capacidade de extração do mandril após o término do processo de enrolamento. Para realizar a extração do mandril é normalmente utilizada uma ferramenta auxiliar que tem por nome punção de extração. Este elemento tem o seu trabalho facilitado se houver uma pequena inclinação do mandril no processo de enrolamento. Esta inclinação deve estar compreendida entre 0.004584° e 0.022918° e visa apenas facilitar o processo extrativo não afetando por isso as características estruturais do elemento. Para a produção de formas cilíndricas ou de veios não existe nenhuma restrição ao tipo de enrolamento que pode ser efetuado. Para que o cilindro ou veio seja capaz de suportar uma maior gama de solicitações devem ser aplicados de forma alternada enrolamentos circunferenciais e helicoidais.

Com a conceção de veios ou cilindros realizados por enrolamento filamentar é possível reduzir os típicos problemas de dimensionamento das ligações, uma vez que este conceito de processo permite a colocação de juntas ou excertos *in-situ* nas extremidades dos produtos gerados. Para carregamentos que estejam perfeitamente identificados como sendo de torção a melhor solução passa por realizar um enrolamento com um ângulo de 45° . O único problema apreciável resultante da produção de veios em materiais compósitos passa pelo efeito de parede espessa.

3.5.4.4 Formas Cilíndricas planas (volantes de inércia)

Cilindros planos realizados utilizando materiais compósitos têm uma grande capacidade de armazenamento de energia devido a sua elevada resistência específica, elevada resistência á tração ao longo das fibras de reforço e apresentam modos seguros de rotura.

3.5.4.5 Isogrelhas

Uma geometria de mandris que poderia ser adotada são as isogrelhas, mas a sua utilização neste projeto não parece ser o mais indicado.

Tipicamente estes elementos são produzidos com porções de materiais metálicos que soldados uns aos outros constituem a forma do corpo desejado. A utilização deste tipo de elementos visa aumentar a rigidez do produto a produzir sem por sua vez aumentar em muito o seu peso. Usualmente as isogrelhas são formadas por vigas dispostas em ângulos de 30^0 , 60^0 ou 0^0 .

Analisando tudo o que já foi referido anteriormente as isogrelhas devem ser utilizadas para substituir estruturas metálicas que tenham de ter levada rigidez mas peso reduzido. Uma estrutura formada por isogrelhas tem como vantagem a sua reduzida sensibilidade a imperfeições construtivas, quando comparada com as soluções tradicionais. A utilização de técnicas de fabrico avançadas na produção de isogrelhas permite a produção de peças aonde ocorre uma co-cura simultânea entre as peles do compósito e a isogrelha.

3.5.5. Padrões de enrolamento

O processo de enrolamento filamentar permite pode ser realizado segundo três padrões básicos de enrolamento. Esses padrões são:

- Enrolamento helicoidal;
- Enrolamento circunferencial;
- Enrolamento polar.

3.5.5.1 Enrolamento Helicoidal

O processo de enrolamento helicoidal caracteriza-se pela rotação contínua do mandril, enquanto o carro de alimentação da fibra sofre um movimento de translação para a frente e para trás. O carro de alimentação tem uma velocidade controlada tornando possível obter o ângulo de hélice desejado. Nos padrões atualmente mais utilizados verifica-se que são estabelecidos vários circuitos helicoidais. Para que o padrão de enrolamento se encontre completo é necessário realizar algumas voltas até que se obtenha uma hélice adjacente á primeira.

Quando um elemento é enrolado segundo este padrão podemos identificar visualmente alguns cruzamentos de fibras em determinados pontos específicos do mandril.

O número de cruzamentos ocorridos em cima do mandril é alterado consoante o desfasamento no retorno das fibras. O conhecimento adquirido ao longo dos anos diz que com uma diminuição do número dos

cruzamentos existe um aumento da resistência á compressão no sentido longitudinal e o aumento do número de cruzamentos aumenta a tenacidade no sentido transversal.

Para este padrão de enrolamento uma camada é constituída por 2 lâminas equilibradas. As rotações do mandril por cada circuito sofrem uma alteração consoante o ângulo de enrolamento, a largura de banda de filamentos, o diâmetro do mandril e o comprimento total do componente.

3.5.5.2 Enrolamento Polar

Quando é utilizado este padrão de enrolamento, os filamentos passam tangencialmente às aberturas polares existentes no topo das peças que se pretende fabricar. Este processo é constituído por um único circuito. Tecnicamente este género de enrolamento é alimentado por um braço que descreve um grande círculo, resultando desta operação um enrolamento plano. Como o mandril se encontra tipicamente regulado para avançar uma largura de banda em cada rotação, as sucessivas bandas são depositadas de uma forma adjacente às anteriores.

3.5.5.3 Enrolamento Circunferencial

Enrolamentos com padrões circunferenciais resultam do enrolamento com ângulos de hélice muito elevados (próximos de 90º). Para cada rotação completa do mandril existe um avanço de uma banda de alimentação. Para este tipo de enrolamento verifica-se que a velocidade de rotação do mandril é muito superior á velocidade de avanço do carrinho.

Os padrões circunferenciais normalmente são aplicados á parte cilíndrica dos depósitos fechados enquanto os enrolamentos helicoidais ou polares são utilizados para realizar o reforço do topo dos reservatórios.

Na próxima tabela serão apresentados as principais vantagens dos diversos padrões de enrolamento.

Tabela 10 Principais vantagens de cada padrão de enrolamento filamentar

Padrão de Enrolamento	Vantagens
Enrolamento Helicoidal	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Grande versatilidade; ✓ Permite a qualquer combinação de diâmetros poder ser enrolada. Para tal é apenas necessário o ângulo e o circuito para fechar o padrão; ✓ Ajustamentos menores podem ser realizados alterando apenas a largura de banda de filamentos;
Enrolamento Polar	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Processo simples de enrolamento uma vez que não há retorno do carro de alimentação; ✓ A velocidade de enrolamento pode ser constante; ✓ Velocidade constante gera menos bolhas quando são utilizadas resinas molhadas; ✓ Permitem o enrolamento de superfícies esféricas, para tal é necessário elevar a velocidade de enrolamento;
Enrolamento Circunferenciais	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Permitem realizar de uma forma simples as extremidades dos reservatórios; ✓ São geralmente utilizados em combinação com enrolamentos polares e helicoidais de forma a obter uma estrutura equilibrada no que diz respeito as tensões instaladas.

3.5.6. Dimensionamento de componentes

Consultando os autores D. V. Rosato e C. S. Groove e a sua obra [20] verifica-se que a grande maioria das estruturas obtidas por enrolamento filamentar foram desenvolvidas de forma a otimizar a sua relação peso/resistência.

Segundo estes mesmos autores o principal critério de dimensionamento deve ser a orientação das fibras, consistindo o método mais básico em orientar as fibras segundo a direção na qual ocorrem as tensões principais. A seleção do número de filamentos de fibras necessários deve ser realizada consoante a grandeza das referidas tensões principais.

Para as situações onde se verifica que devido a razões de origem geométrica é impossível orientar as fibras na direção das tensões principais, deve-se optar por dispô-las de um forma que consigam responder de um modo satisfatório às solicitações de origem desconhecida. Colocar as fibras com um certo desvio leva possibilita a obtenção de uma estrutura equilibrada e que sejam dispostas proporcionalmente fibras segundo duas orientações diferentes (helicoidais de ângulo baixo e circunferencial).

Por fim, uma estrutura equilibrada é aquela em que as suas fibras, dispostas sobre uma qualquer direção, estejam sujeitas a iguais tensões aquando de uma situação de carregamento da estrutura.

Para elementos maioritariamente sujeitos aos efeitos da pressão interna o cálculo da sua tensão de rotura pode ser realizado com base na tensão de rotura á tração das suas fibras. No entanto, para elementos sujeitos a grandes pressões externas este método de cálculo não deve ser utilizado uma vez que conduzirá a resultados erróneos.

Como sabemos a carroçaria de um autocarro, quando desprezamos as suas portas e janelas, apresenta uma forma que se assemelha á de um tubo. No entanto, para realizar o seu dimensionamento é absolutamente necessário ter estas duas modificações em consideração. Portas e janelas devem ser consideradas porque representam uma percentagem muito significativa da área do autocarro e estão na direção de quase todas as trajetórias do enrolamento, impedindo que se apliquem os cálculos tradicionais para este tipo de estrutura.

3.5.7. Custo do processo de enrolamento filamentar de termoendurecíveis e termoplásticos

Na próxima tabela, apresenta-se uma comparação entre os custos mais significativos dos processos de enrolamento filamentar com matrizes termoendurecíveis e termoplásticas na produção de componentes estruturais fabricados em série e com um padrão de enrolamento complexo.

Custo relevante por componente fabricado	Enrolamento filamentar com termoendurecíveis		Enrolamento filamentar com termoplásticos	
Matéria-prima*	Fibra + resina	1	Pré-impregnado	1,6
Solventes	Acetona	0,04	-	-
Remoção de desperdícios		0,015		0,001
Mão-de-obra	1 técnico 1 assistente	0,43	1 técnico ¼ de assistente	0,19
Outros	Overhead, teste, acabamentos ...	1,45	Overhead, teste, acabamentos ...	1,45
Tempos de fabrico por componente	preparação e limpeza**	1	-	0,62
Total		3,935	3,861	

* Custos para a mesma fibra e matrizes com propriedades semelhantes.

** Não inclui o tempo necessário à pós-cura da resina termoendurecível.

Figura 16 Custos relevantes do enrolamento filamentar de termoendurecíveis e termoplásticos (adaptado de [21])

Analisando os dados da tabela verifica-se que o enrolamento filamentar de termoplásticos reforçados é hoje mais barato em termos de custos globais. Estes dados permitem ainda verificar que o custo da matéria-prima, outros custos não identificados e os custos relativos á preparação e limpeza são os parâmetros que implicam um maior custo quer a matriz seja termoplástica ou termoendurecível.

Os termoendurecíveis reforçados, no entanto conseguem apresentar custos de matéria-prima mais baixos (cerca de 60%) que os equivalentes termoplásticos.

Os custos relativos á mão-de-obra são bastante superiores quando se utilizam termoendurecíveis, verificando que necessitam de uma maior quantidade de tempo para estarem concluídos.

Por fim apresentamos um quadro resumo das vantagens e desvantagens apresentadas pelo processo de enrolamento filamentar. Em seguida serão apresentadas de forma simplificada essas vantagens e desvantagens no que respeita á deposição das fibras, da maquinaria, dos produtos que podem ser utilizados no processo e os processos para a cura do material.

Tabela 11 Vantagens e desvantagens do processo de enrolamento filamentar.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Permite a deposição da fibra de forma exata e repetitiva (de camada em camada dentro da mesma peça e de peça em peça dentro de cada série produtiva); • Faz uso de filamentos contínuos em toda a superfícies do componente sendo possível facilmente orientar as fibras na direção do carregamento; • Permite construir estruturas grandes, que podem apresentar Paredes grossas, que 	<ul style="list-style-type: none"> • A forma do componente deve permitir a remoção do mandril. • Alguns tipos de enrolamentos também dificultam a remoção do mandril; • Não permite a obtenção de forma expedita de curvaturas negativas. Para contornar esta situação existem 2 opções. A primeira opção passa por enrolar o componente estabelecendo-se uma ponte para as partes côncavas e aplicar

<p>seriam muito difíceis de obter, por exemplo por moldação em autoclave;</p> <ul style="list-style-type: none">• Quando apenas é necessário usar mandris esta parcela no custo produtivo é muito baixo; <p>Para produções de séries grandes o custo da mão-de-obra é mais baixo do que nos restantes processos;</p> <p>No enrolamento filamentar são possíveis soluções muito mais baratas do que nos casos de deposição automática de pré-impregnados ou de processos que usem pré-formas;</p>	<p>posteriormente um contramolde da concavidade durante a cura da resina. Esta alteração ao processo típico de enrolamento tradicional pode levar á necessidade de baixar a tensão de enrolamento tradicional e á necessidade de posterior corte das aparas;</p> <p>A segunda opção passa por efetuar um enrolamento da concavidade num contra-madril macho e após a sua remoção colocar a concavidade obtida no mandril principal;</p> <ul style="list-style-type: none">• Não permite uma mudança fácil do caminho do enrolamento da fibra dentro da mesma camada. No entanto, o mesmo poderá ser feito recorrendo á utilização de pinos ou mesmo por escorregamento do fio das fibras;• Necessita de um mandril, que para algumas situações pode ser complexo e dispendioso;• Apresenta normalmente a nível exterior um especto fraco e rugoso.
--	--

4. Estruturas em Sanduiche

Construtivamente, independentemente dos materiais utilizados, as estruturas sanduiche são compostas por duas faces exteriores que são tão finas, quanto estruturalmente possível, com elevada resistência estrutural e um núcleo bastante mais espesso, que tenta ser o mais leve possível, e apresenta uma rigidez consideravelmente mais baixa. O núcleo separa as duas faces que são coladas utilizando adesivos, conseguindo-se desta forma combinar uma estrutura com elevada rigidez e um baixo peso.

Existem muitas formas de combinar os diversos materiais para a obtenção de estruturas sanduiche consoante as necessidades que as aplicações exigem. Maioritariamente as faces são formadas por aço, alumínio, madeira ou laminados de compósitos. Para o núcleo normalmente são utilizados materiais como: balsa, espumas poliméricas de baixa densidade, favos de abelha. Cortiça ou inúmeros outros materiais. [22 e 23]

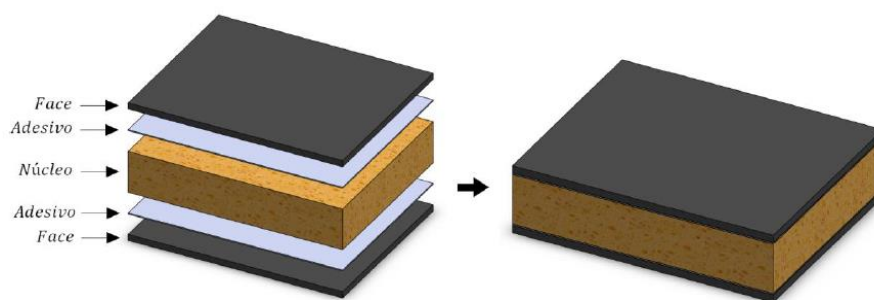


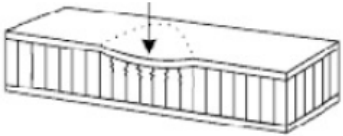

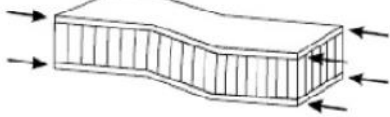

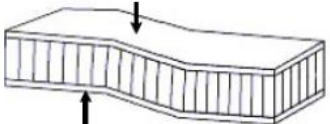


Figura 17 Componentes de uma estrutura sandwich, figura retirado de [22]

Relativamente ao seu comportamento mecânico as estruturas em sanduiche assemelham-se a perfis em I, em que os banzos são as faces da sanduiche e a alma o seu núcleo. Neste tipo de estruturas são as faces que se encarregam de suportar os esforços de flexão impostos á estrutura, trabalhando tal como o verificado para um perfil em I uma face á compressão e a outra á tração. O núcleo fica encarregue de evitar o deslizamento das faces, suportando assim os esforços de corte originados por torção ou esforço transverso.

Sabendo nós que que o núcleo tem dimensões iguais as das faces este terá de possuir resistência ao esmagamento e enrugamento causado pela concentração das cargas.

Para completarmos este breve estudo sobre estruturas sanduiche é necessário conhecer quais os seus principais modos de falha e quais as principais razões para o seu aparecimento. Para guiarmos o nosso estudo em relação a este tema consultamos o livro "Design Requirements for Bonded and Bolted Composite Structures"[24]. A tabela que se apresenta seguidamente é adaptada dessa obra.

Tabela 12 Modos de falha e respectivas causas em estruturas sandwich adaptado de [24]

Modo de Falha	Causas
<p>Esmagamento local do núcleo</p> 	<p>Ocorre quando a resistência à compressão do material do núcleo é demasiado baixa.</p>
<p>Enrugamento local</p> 	<p>Verifica-se quando a espessura do painel ou a resistência do núcleo ao corte são demasiado baixas.</p>
<p>Enrugamento geral</p> 	<p>Este fenómeno pode surgir em consequência de um enrugamento local, ocorrendo quando o módulo de corte do núcleo ou a resistência ao corte do adesivo é demasiado baixo.</p>
<p>Enrugamento das faces</p> 	<p>Falha à compressão do núcleo (enrugamento para dentro), ou falha nos adesivos (enrugamento para fora), pode ocorrer, dependendo da resistência relativa do núcleo à compressão em comparação com a resistência dos adesivos em tensão no plano.</p>
<p>Falha causada pelo esforço transversal</p> 	<p>Ocorre quando a resistência do núcleo ao corte ou a espessura do painel são insuficientes.</p>
<p>Falha das faces</p> 	<p>Espessura insuficiente das faces e/ou resistência das faces insuficiente podem causar falha das faces, que pode ocorrer tanto na face à tração como na face à compressão.</p>
<p>Instabilidade local</p> 	<p>Enrugamento intracelular (passível de ocorrer apenas em materiais celulares) ocorre quando as faces são muito finas em relação ao tamanho de célula. Este efeito provoca falha se se propagar para células adjacentes.</p>

4.1. Perspetiva histórica

Em 1820 Duleau demonstrou a eficiência da utilização de duas faces que cooperam entre si e afastadas uma da outra de forma a aumentar a resistência da estrutura. Mas a utilização de sanduiches em componentes estruturais só teve início durante a segunda grande guerra, com a produção de bombardeiros que tinham

elementos formados por uma sanduiche de contraplacado com madeira de balsa. Após a guerra verificou-se a nível industrial um crescente interesse neste género de estruturas, impulsionado principalmente pelo desenvolvimento de núcleos em favo de mel. A partir da década de 60 com o advento da indústria aeroespacial, ocorre a massificação deste género de estruturas na indústria da construção civil, automóvel, naval, etc...

4.2. Vantagens e desvantagens do uso de estruturas em sanduiche

De acordo com o indicado no trabalho de Leite [25] a grande variedade de materiais passíveis de serem utilizados como núcleo de painéis sanduiche pode funcionar em simultâneo como uma vantagem e desvantagem. Pois se por um lado dá ao responsável pelo projeto a possibilidade de ter uma estrutura com o comportamento mecânico desejado, por outro lado, também é difícil a um projetista gerir uma vasta quantidade de materiais.

De entre as principais vantagens da utilização de sanduiches temos: a elevada resistência e rigidez específica da estrutura resultante, bom comportamento á flexão, o seu baixo peso, boas propriedades de resistência ao impacto. Estas estruturas têm, por norma, a capacidade de garantir um bom isolamento térmico e acústico. Atendendo ao seu modo de produção, permite a obtenção de peças de geometria complexa, tornando possível a obtenção de estruturas complexas numa única peça.

A principal desvantagem inerente á utilização de painéis de sanduiche, advém do conhecimento do comportamento deste género de estruturas ser ainda baixo. Este facto pode levar a ocorrerem problemas relacionados com a temperatura e incompatibilidade de materiais, aliados ainda a problemas relacionados com fenómenos de fadiga.

Esta limitação pode ser superada, se na fase de projeto a opção for critérios conservadores de dimensionamento, o que poderá levar ao sobredimensionamento exagerado da estrutura, levando ao aumento do peso final da peça o que anulará a sua principal vantagem.

Os painéis de sanduiche levantam ainda problemas de origem ambiental, nomeadamente na reciclagem no final da sua vida útil e na sua fase de produção.

Tabela 13 Vantagens e desvantagens da construção sandwich, adaptado de [25]

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alta resistência específica; ✓ Alta rigidez específica; ✓ Baixo peso; ✓ Isolamento térmico e acústico; ✓ Capacidade de resistência à corrosão; ✓ Facilidade de construção de formas complexas; ✓ Capacidade de absorção de energia; ✓ Poucas peças estruturais necessárias; 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fracas possibilidades de reciclagem e de reparação (compósitos); ✓ Falta de informação dos engenheiros e <i>designers</i>; ✓ Problemas de temperatura/resistência ao fogo; ✓ Requer um maior controlo de qualidade; ✓ Variedade de critérios de rotura; ✓ Existem ainda alguns problemas relacionados com a incompatibilidade de materiais;
<p>✓ Múltiplas possibilidades de escolha de materiais.</p>	

5. Design e Conceção de Peças Curvas em Compósitos

No processo de enrolamento da carroçaria para um autocarro existem zonas que apresentam uma maior sensibilidade, e que portanto requerem uma maior atenção durante o processo de cálculo. Nesta estrutura é facilmente perceptível que as zonas mais sensíveis estão localizadas nos cantos da viatura, sendo assim é importante realizar um estudo sobre as distorções que ocorrem nessas mesmas zonas após o processo de moldação.

Para melhor entendermos este fenómeno analisamos a obra "Mechanisms generating spring-in of curved composites" [25]. Nesta obra os autores indicam que com um aumento dos valores do ângulo de curvatura imposto pelo mandril maior é a tendência do compósito de perder essa forma após a moldação. Esta situação pode levar ao aumento das dificuldades no processo de montagem da estrutura o que naturalmente leva a um aumento dos custos de montagem. Segundo o que é referido pelos autores, é possível com exatidão saber qual será a alteração do ângulo devido a efeitos termoelásticos do compósito durante o processo de arrefecimento. A sua experiência de análise de resultados experimentais também lhes permitiu estabelecer de que maneira a contração volúmica, a interação molde-peça e a sua espessura afetam a curvatura da peça.

Os autores estabelecem, então, uma relação entre a contração volúmica nas zonas de curvatura e o grau de interação molde-peça. À medida que o grau de interação aumenta existe também a tendência de aumentar o fenómeno de contração "spring in". Baixando o grau de interação molde-peça, usando para tal um molde externo para produzir essa curvatura, essa tendência diminui bastante dando por vezes origem a um processo de "spring out". Para ambas as situações existe uma maior amplitude de efeitos quando as peças apresentam pequenas espessuras.

5.1. Contração Volúmica

Com o decorrer do processo de arrefecimento após a cura do compósito e para uma situação em que é utilizada uma resina de epóxico e fibra de carbono verifica-se que o coeficiente de expansão transversal é bastante superior ao coeficiente de expansão. Sabendo isto, é fácil de entender que estes compósitos não são os mais indicados para a realização de peças curvas pois sofrem intensamente do fenómeno de "Spring in" após a cura.

Este fenómeno pode ser diminuído quando se procede a um reaquecimento da peça após o processo de cura, este fenómeno de diminuição do "spring in" quando a peça é reaquecida tem a designação de "spring in" termoelástico e é descrito matematicamente pela seguinte equação:

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = (\alpha_l - \alpha_T) \cdot \Delta T \quad (eq. 3)$$

Nesta equação $\Delta\theta$ é a variação do ângulo da curvatura, α_T e α_l são respetivamente os coeficientes de expansão transversal e no plano e ΔT é a variação da temperatura. Da análise prática realizada pelos autores na obra [26] com peças em forma de L constituídas por reforços unidireccionais e curadas em forno verifica-se que para uma variação de temperatura de 160° (entre 20° e 180°) a variação do ângulo teta é linear e de cerca de

0.47°.

5.2. Contração química após vitrificação

O fenómeno de contração química, pode analiticamente ser descrita da seguinte forma:

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = (\alpha_I - \alpha_T) \cdot \Delta T + (\theta_I - \theta_T) \quad (eq. 4)$$

Esta equação é apenas válida após a vitrificação do compósito, sendo similar á equação estabelecida para a contração térmica do compósito, sendo introduzidos na equação os termos θ_I e θ_T que representam respetivamente as contrações químicas no plano e na direção transversa. Esta equação apresenta-se como uma forma simplificada da equação de Radford e Rennick.

Os trabalhos de campo realizados indicam que para grande parte das resinas a contração química é muito baixa podendo este efeito ser desprezado para o cálculo do "spring-in" da peça.

5.3. Contração antes da vitrificação

A grande maioria dos modelos estabelecidos para o estudo da contração após a cura da resina não permitem estabelecer uma distinção entre a contração ocorrida antes e após a vitrificação da resina. No entanto, verifica-se que durante o processo de cura nomeadamente entre a gelificação da resina e a sua vitrificação o material compósito está num estado elastomérico podendo deformar-se quando sujeito a esforços de corte ao longo da sua espessura. Ora se não existissem as fronteiras geométricas do molde, o compósito teria um mecanismo para lidar com a alteração do comprimento ao longo do seu perímetro causado pela contração na direção da espessura sem gerar tensões na direção da fibra. Evitando-se a ocorrência de algum fenómeno de "spring-in".

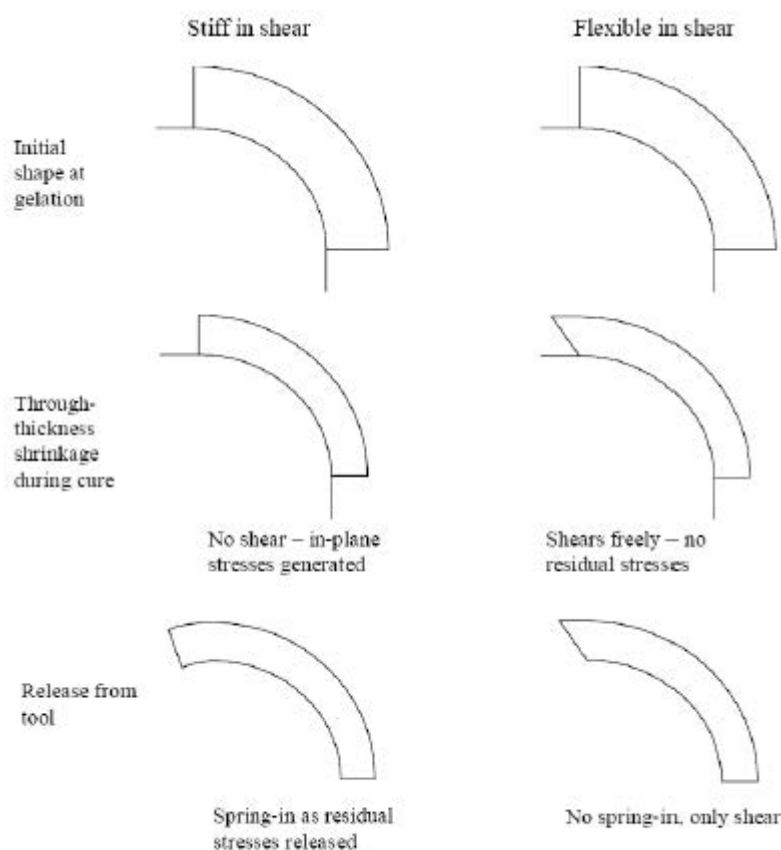


Fig. 2: Change of angle due to a through-thickness contraction

Figura 18 Variação do ângulo e da espessura do laminado com o processo de cura retirado de [26]

A figura anterior demonstra os vários fenómenos de contração antes da vitrificação. Analisando o lado esquerdo da ilustração podemos verificar o que ocorre quando um material rígido ao corte, ou seja, apresenta o comportamento típico de um material compósito curvo após a cura, para este material verifica-se uma tendência para a contração na direção transversa. No entanto, enquanto a peça se encontra restringida de movimentos devido a existência do molde, não existe qualquer alteração da forma do compósito, gerando-se apenas tensões no plano. Após a desmoldagem como era expectável as tensões diminuem de forma significativa, mas a peça passa a apresentar uma deformação "spring in".

Os esquemas do lado direito da ilustração pretendem representar o início da cura da resina em que o material apresenta uma grande flexibilidade ao corte. Para estas situações não é possível verificar um aumento significativo da tensão no plano, existe sim uma contração da peça segundo a direção transversa a uma deformação de corte. Portanto, durante o início da cura, o compósito apenas sofre uma deformação de corte transversa não estando sujeito ao fenómeno de "spring-in".

Saindo do contexto académico podemos constatar que na prática em nenhum momento o compósito dispõe de total liberdade para se deformar. Para materiais que no modo viscoso apresentam grande viscosidade ou para peças que apresentem uma relação comprimento\espessura elevada a equação vista para a situação de contração química após vitrificação é inteiramente válida e conduz á obtenção de valores de "spring-in" compatíveis com os verificados na prática. No entanto para peças realizadas com resinas de baixa viscosidade ou

que tem uma relação menor entre o comprimento e a espessura, verifica-se que os valores efetivamente obtidos na prática são menores que os previstos pela mesma equação. Os resultados práticos indicam que o "spring-in" é controlado pela variação da deformação transversa entre os estados de gelificação e vitrificação incluindo efeitos térmicos.

Para reduzir o efeito da contração química basta apenas garantir que a gelificação ocorre a uma temperatura mais baixa do que a temperatura de vitrificação.

5.4. Interação molde-peça

Para muitos dos materiais habitualmente utilizados para a produção de moldes e mancais verifica-se que o seu coeficiente de expansão térmico é superior ao do compósito, esta diferença de coeficientes de expansão leva a que exista um aumento da pressão do mandril contra o enrolamento como resultados das reduzidas tensões de corte existentes na interface entre o molde e a peça. Para placas planas de compósito AS418552 estudado pelos autores [26] as tensões instaladas na peça são elevadas devido a este efeito, no entanto estas tensões não provocam um aumento significativo da distorção, dado que pelo menos de forma aparente são uniformes ao longo da espessura da placa. Para uma situação em que a peça está sujeita a um gradiente de tensões ao longo da sua espessura, produzir-se-ia uma distorção que poderia dar origem a um aumento ou diminuição do "Spring-in", dependendo se era ou não utilizado um molde externo. Para peças em que o enrolamento é feito com a utilização de um molde externo, as fibras têm uma tendência a dobrar mais no raio interno, sendo a tensão resultante da interação molde-peça suportada pelo raio externo. Esta situação tende a contrariar os efeitos provocados pelos outros fenómenos de "spring-in" e para uma peça de baixa espessura pode levar ao aparecimento de "spring-out".

5.5. Consolidação

Durante o processo de consolidação o compósito pode sofrer uma redução da sua espessura. Esta redução é causada pela contração na cura antes do processo de gelificação da resina. Para situações em que podem ser utilizados moldes externos verifica-se que tal utilização reduz a diminuição da espessura nas secções curvas curadas, mas pode provocar uma ligeira alteração da geometria pois conduz a um visível aumento da espessura do canto, aumentando consequentemente a intensidade do "spring-in" termo-elástico.

Estes fenómenos podem ser analisados pelo método de elementos finitos variando a fração volúmica de fibra no compósito e a geometria das peças.

Podemos ainda dizer que existem outros fenómenos de consolidação das resinas que alteram a geometria das peças curvas que ainda não estão completamente compreendidos e estudados. Por exemplo, as tensões geradas pela pressão do autoclave nos raios internos da curvatura onde se verifica a reacção por tracção das fibras, intensificando assim o fenómeno de "spring-in". Mesmo fazendo o uso correto da autoclave para impedir a separação da peça do molde esta pode continuar a ocorrer nos cantos aumentando o "spring-in" na peça.

6. Métodos de redução da permeabilidade das fibras - técnica de Pinch-off

De acordo com C.D. Rudd e os restantes autores de “Liquid moulding technologies” [27] o Pinch-off é uma técnica que conceitualmente é bastante simples. Basicamente consiste em prender o reforço de fibra entre os dois elementos de elevada rigidez, para que desta forma se impeça que a resina fluía no interior ou exterior da região do molde que pretendemos manter seca.

Com esta técnica tira-se partido da força necessária para o aperto dos dois elementos constituintes do molde para comprimir significativamente os filamentos da fibra reduzindo consequentemente a sua permeabilidade. Para aumentar a duração da ferramenta, logo diminuir o seu desgaste por cada ciclo de fabrico, é comum incluir inserções de borracha ou silicone nas extremidades das regiões que se pretende manter secas da resina. Embora como já tivemos oportunidade de referir o processo de Pinch-off seja simples apresenta alguns problemas que o podem tornar indesejável a sua utilização. A ausência de um mecanismo que garanta uma selagem periférica pode levar a uma elevada dispersão da resina, à libertação de vapores nocivos, a danos na superfície dos moldes e ainda a problemas relacionados com a limpeza do molde. No entanto o principal problema relacionado com a utilização desta técnica prende-se com a impossibilidade de controlar o processo de difusão da resina durante o processo de infusão.

Os componentes resultantes da utilização deste processo necessitam como é óbvio de um processo de maquinagem para que sejam removidas as fibras que não foram impregnadas durante o processo de infusão. Além disso, a zona sujeita à operação de corte das fibras vai constituir uma fonte de potencial degradação do componente, uma vez que as fibras vão ficar expostas aos agentes ambientais sem qualquer proteção.

Embora o método de Pinch-off possa ser utilizado em contexto industrial ele é maioritariamente utilizado para a produção de pequenas séries ou na produção de protótipos.

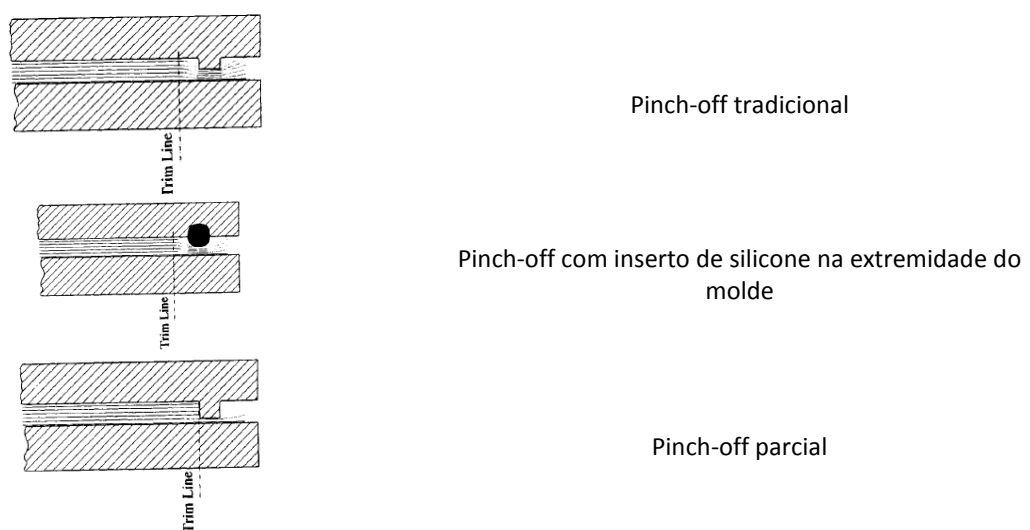


Figura 19 Técnicas de Pinch-off (adaptado de [27])

7. Tipos de Ligações

Independentemente do material utilizado para fabricar a carroçaria, esta irá sempre necessitar ter ligações com outros elementos. A título de exemplo, serão necessários elementos que permitam a ligação do piso da carroçaria do autocarro ao seu chassi.

As juntas originam problemas de fabrico na sua execução, constituem zonas de potencial colapso da estrutura, encarecem o produto final e implicam, geralmente, um aumento de peso da estrutura. O projetista deve assim restringir o seu uso ao mínimo possível.

As ligações utilizadas nos materiais compósitos são divisíveis em três tipos diferentes:

- Ligações aparafusadas e rebetadas;
- Ligações coladas com adesivo;
- Ligações coladas por fusão do polímero base do compósito, que são exclusivas dos compósitos de matriz termoplástica devido à sua capacidade de reprocessamento.

7.1. Ligações aparafusadas e rebetadas

Este tipo de ligação é muito usado em materiais compósitos, nomeadamente em estruturas aeronáuticas. As principais vantagens e desvantagens estão evidenciadas na seguinte tabela:

Tabela 14. Vantagens e desvantagens do uso de ligações aparafusadas e rebetadas

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Permitem a montagem rápida e repetida dos componentes para execução de reparações ou substituição sem os danificar. • Não são afetadas por ciclos térmicos e ambientes húmidos. • Permitem uma fácil inspeção visual para a deteção da presença de dano ou desgaste. • Apresentam um bom desempenho sob solicitações de tração. 	<ul style="list-style-type: none"> • A execução do furo interrompe a continuidade das fibras e reduz a resistência dos substratos. • A presença do furo induz concentração de tensões nos componentes podendo assim originar a sua rotura. • As propriedades viscoelásticas dos polímeros originam relaxação das tensões, promovendo a diminuição do pré-esforço de aperto e reduzindo assim o desempenho da junta. • Adicionam peso à estrutura.

Dentro das ligações aparafusadas e rebetadas temos dois tipos:

- Sobreposição simples;
- Sobreposição dupla.

Na imagem seguinte podemos ver esquematicamente os dois tipos referidos:

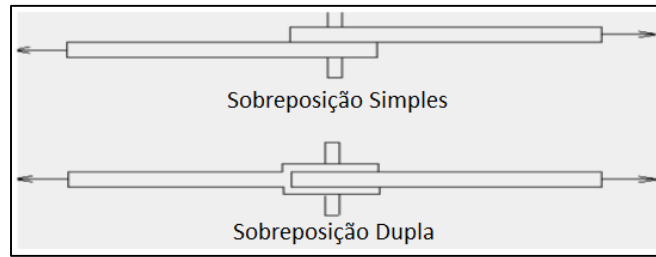


Figura 20. Tipos de sobreposição, retirado dos apontamentos da disciplina de materiais compósitos do professor António Torres Marques [28]

O melhor desempenho da sobreposição dupla, uma vez que apresenta resistências superiores em 20%, devido à excentricidade da carga que provoca uma diminuição dos efeitos de flexão, compensa a simplicidade da sobreposição simples.

Existem três fatores, para além do tipo de sobreposição, que mais influenciam a resistência mecânica:

- Fatores geométricos tais como as relações e/d , w/d e t/d ;
- Parâmetros do material tais como as orientações das camadas e as sequências de empilhamento;
- Parâmetros de fabrico relacionados com a qualidade do furo e do material circundante.

O modo de rotura depende de vários fatores, tais como o tipo de fibra, a sua orientação e sequência de empilhamento, as propriedades da matriz e a geometria da junta.

Os modos de rotura em juntas com furo são:

- Corte (a);
- Tração (b);
- Clivagem (c);
- Esmagamento localizado (d).

Na imagem seguinte podemos ver um esquema representativo destes modos de rotura:

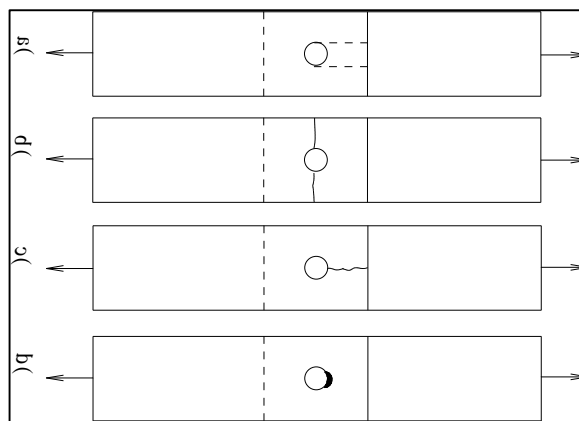


Figura 21. Esquema representativo dos modos de rotura em ligações aparafusadas, retirado dos apontamentos da disciplina de materiais compósitos do professor António Torres Marques [28]

Os modos de roturas por corte e tração são catastróficos e devem portanto ser evitados.

A rotura por esmagamento localizado é não catastrófica, portanto, recomenda-se projetar este tipo de ligações para que a rotura ocorra neste modo. Para que tal aconteça devemos manipular a geometria de forma a que as relações e/d e w/d sejam elevadas (>3 e >6).

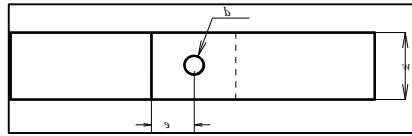


Figura 22. Esquema explicativo das relações geométricas, retirado dos apontamentos da disciplina de materiais compósitos do professor António Torres Marques [28]

Os laminados unidirecionais ou com grande preponderância de camadas orientadas a 0° apresentam tipicamente roturas por corte e clivagem. O uso de camadas a $\pm 45^\circ$ é um método empregue para evitar a rotura por corte. No entanto, um número excessivo deste tipo de camadas reduz a resistência à tração da junta.

A resistência mecânica de uma junta pode ser significativamente aumentada caso se consiga reduzir a concentração de tensões e usar materiais mais tenazes na zona do furo.

7.2. Ligações coladas

As ligações coladas consistem na sobreposição de dois elementos que são unidos através de um adesivo. São comuns em aplicações correntes como, por exemplo, na indústria de embalagens, na madeira e mobiliário e no calçado. Tem também aplicações mais exigentes, como, por exemplo, na indústria aeronáutica.

As principais vantagens e desvantagens deste tipo de ligação relativamente às juntas com furos estão evidenciadas na seguinte tabela:

Tabela 15. Vantagens e desvantagens das ligações coladas.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> A distribuição da carga é feita sobre uma superfície maior, o que diminui a concentração de tensões e, consequentemente, proporciona um melhor desempenho sob solicitações de fadiga; A natureza viscoelástica do adesivo promove o amortecimento de vibrações; Permite uma economia no número de peças e no seu peso; Apresentam uma grande capacidade de vedação e de isolamento térmico; Evita a corrosão galvânica que ocorre nas ligações de materiais diferentes (substratos metálicos); É mais facilmente adaptável à junção de superfícies irregulares; 	<ul style="list-style-type: none"> Os ciclos de cura de alguns adesivos são longos e requerem a aplicação de pressão e temperatura, o que pode constituir uma limitação ao tamanho da peça, caso o processo exija o recurso a um forno ou autoclave; Necessidade de limpeza e tratamento prévio das superfícies; São sensíveis aos fatores ambientais (temperatura, humidade e radiações ultravioleta); Difícil inspeção para verificação da qualidade da junta; Criação de ligações de carácter definitivo, não permitindo a desmontagem sem danificação ou destruição dos componentes; Mau desempenho sob solicitações de arrancamento ("peeling");

<ul style="list-style-type: none">• Permite a obtenção de contornos suaves, o que é particularmente importante em termos aerodinâmicos e no aspecto estético;• Geralmente é um processo mais económico e mais rápido. O facto de ser uma operação simples, rápida e fácil de automatizar permite aumentar as cadências de produção e baixar os custos.	<ul style="list-style-type: none">• Processo de fabrico que necessita de um controlo mais rígido e mão-de-obra qualificada;• Problemas de saúde associados à toxicidade e de segurança inerentes à inflamabilidade dos adesivos.
---	---

Dentro das ligações coladas incluem-se vários tipos:

- Sobreposição simples;
- Sobreposição dupla;
- Reforço simples;
- Reforço duplo;
- Rampa;
- Degrau.

Na imagem seguinte podemos ver uma representação esquemática desses vários tipos de ligações de junta coladas.

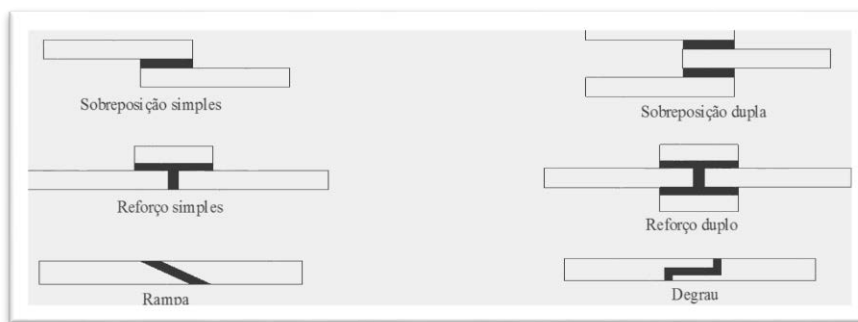


Figura 23. Tipos de juntas coladas, retirado dos apontamentos da disciplina de materiais compósitos do professor António Torres Marques [28]

Devido à sua simplicidade de execução, a junta de sobreposição simples, é a mais frequente. Nesta a carga é transmitida entre substratos por tensões de corte nos adesivos. Todavia, a aplicação descentrada da carga provoca efeitos de flexão, que originam o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo, reduzindo a resistência da junta.

Para minimizar o problema referido no parágrafo anterior, pode-se recorrer a juntas de sobreposição dupla. Nestas os efeitos de flexão são consideravelmente inferiores.

As juntas com reforço simples ou duplo apresentam resistência superior às juntas de sobreposição simples.

No entanto, aquelas que apresentam as resistências mais elevadas são as juntas em forma de degrau ou rampa. Na prática, porém, a dificuldade de maquinar os degraus ou a rampa esbatem as referidas vantagens e encarecem o processo de fabrico.

Os modos de rotura para ligações em juntas coladas de materiais compósitos são:

- Rotura coesiva no interior do adesivo;
- Rotura adesiva na interface entre o substrato e o adesivo;
- Rotura de um dos substratos.

Na figura seguinte podemos ver os três modos referidos:

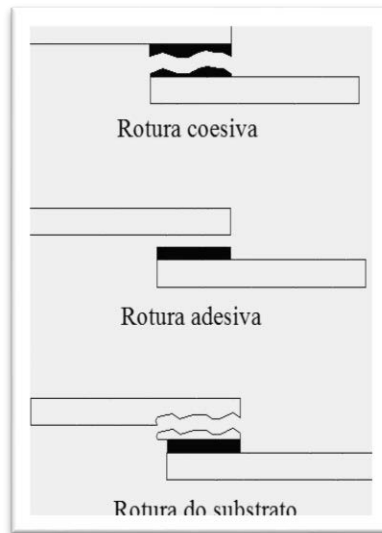


Figura 24. Modos de rotura de ligações coladas em materiais compósitos, retirado dos apontamentos da disciplina de materiais compósitos do professor António Torres Marques [28]

A rotura coesiva ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo.

A rotura adesiva só ocorre, segundo alguns autores, se houver má preparação das superfícies. Todavia, alguns trabalhos mostraram que, em juntas coladas de sobreposição simples, existe variação de tensões ao longo da espessura do adesivo, e que os valores máximos das tensões ocorrem junto da interface. Isto pode explicar o aparecimento frequente da rotura adesiva. Saliente-se ainda que, muitas roturas, consideradas inicialmente adesivas são, na realidade, roturas coesivas.

A rotura de um dos substratos é demonstrativa de uma junta bem concebida, nomeadamente se a carga de rotura corresponder à resistência nominal do substrato.

Uma ligação colada deve seguir as seguintes regras a nível do projeto:

- Projetar a estrutura de modo a que a junta seja facilmente executável, o acesso do técnico deve ser fácil para que a preparação das superfícies e a colagem decorram sem problemas;
- Projetar as juntas de modo a que a transferência de carga se processe por corte ou por compressão;
- Selecionar o adesivo adequado às características da aplicação (boa resistência mecânica, térmica, química, etc.);

- Garantir uma espessura ótima para o adesivo (entre 0,1 e 0,3 mm), necessária à obtenção do melhor desempenho da junta. Espessuras muito pequenas aumentam o risco de falhas de colagem e espessuras grandes apresentam maior probabilidade da presença de defeitos e de maiores dimensões;
- Incluir no projeto as tensões de origem térmica provocadas pelos diferentes coeficientes de expansão térmica quando se procede à colagem de materiais diferentes;
- Projetar a junta de tal modo que a rigidez axial dos dois substratos seja idêntica;
- Preferir adesivos de alta ductilidade quando estamos em presença de solicitações de impacto ou os substratos apresentam diferente rigidez;
- Usar valores suficientemente elevados para a razão entre o comprimento de sobreposição e a espessura do substrato;
- Preferir laminados que tenham camadas superficiais com as fibras orientadas paralelamente à direção da solicitação;
- Adelgaçar as extremidades dos substratos ou aumentar localmente a espessura da resina nas extremidades da zona de sobreposição, o que reduz a concentração de tensões normais nas referidas zonas.

7.3. Ligações por fusão

Embora a carroçaria realizada em material compósito reforçado por fibra de vidro use, geralmente, como matriz, uma matriz termoendurecível, decidimos fazer referência a este tipo de ligações porque no futuro poderão ser utilizadas matrizes termoplásticas. Isto porque este tipo de ligação é exclusivo dos compósitos de matriz termoplástica.

A ligação estabelece-se por aplicação de calor e pressão adequados, de modo a que a difusão do polímero ocorra na interface. Os principais métodos de aplicação de calor podem-se dividir em três:

- Geração interna;
- Aplicação externa;
- Fricção.

No caso de geração interna de calor, destacam-se a ligação estabelecida através de resistência embebida, constituída por um material compatível com o compósito, e a ligação por indução eletromagnética, típica de compósitos que contenham elementos com alguma condutividade elétrica, como é o caso das fibras de carbono.

Na aplicação externa de calor, merece referência o processamento na prensa de pratos quentes e autoclave.

Finalmente, as ligações estabelecidas por fricção são conseguidas por aplicação de vibrações ou ultrassons.

As principais vantagens e desvantagens deste tipo de ligação estão evidenciadas na próxima tabela:

Tabela 16. Vantagens e desvantagens das ligações por fusão

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• A junta apresenta propriedades semelhantes ao material dos substratos, uma vez que não é inserido um material diferente na interface.• O tratamento superficial necessário é mínimo.• Boa resistência química e à humidade.• Apresentam boa ductilidade, durabilidade e são facilmente reparáveis.• O tempo de processamento e o custo são inferiores aos das juntas coladas com termoendurecíveis.	<ul style="list-style-type: none">• A principal desvantagem prende-se com a necessidade de fornecimento de calor e pressão externas, o que, num processo automatizado, exige equipamento adequado.• O facto de ser um processo exclusivo de compósitos de matriz termoplástica limita a sua aplicabilidade.

8. Manutenção e Técnicas de Inspeção

8.1. Manutenção

Os dados consultados indicam-nos que, de uma forma geral, um autocarro realizado em materiais compósitos requer uma pequena manutenção. Podemos ainda referir que devido à sua composição os autocarros concebidos em materiais compósitos são praticamente imunes aos fenómenos de corrosão e aos ataques provenientes de organismos de origem biológica, como por exemplo fungos. Quando utilizados os aditivos adequados conseguem apresentar uma grande resistência ao fogo e à sua propagação.

Fundamentalmente os problemas que mais afetam este tipo de estrutura serão os fenómenos de delaminação das camadas de fibra. Este fenómeno afeta grandemente as propriedades mecânicas e estruturais e dependendo da extensão do problema pode ser necessário proceder à reparação (se possível, já que só é possível para alguns processos construtivos), ou à sua substituição. Ao longo dos anos a carroçaria do autocarro pode necessitar de ser repintada com tinta que garanta a sua proteção contra os raios UV, que vai perdendo ao longo dos anos.

Em caso de acidente, a manutenção passa por cortar a parte danificada e colocar nessa zona uma nova placa de material compósito são, de forma a unir as duas superfícies recorrendo as técnicas tradicionais de moldação manual.

8.1.1. Efeitos Ambientais

Tal como já foi referido em pontos anteriores as estruturas realizadas em materiais compósitos aguentam com facilidade as agressões provocadas pelo meio ambiente.

Mas convém referir quais os fatores ambientais a que estarão sujeitos.

8.1.1.1. Radiação ultra-violeta (UV)

Os "ultravioletas", ou mais corretamente a radiação ultra-violeta (UV), são parte integrante da radiação emitida pelo Sol e podem ter um impacto significativo na duração dos autocarros pois causam a longo prazo a degradação do material desprotegido e degradação da cor, que em certa literatura é chamado de amarelecimento da fibra. Se a degradação da cor do autocarro é meramente um problema de natureza estética a degradação do material desprotegido a longo prazo afeta a integridade estrutural do mesmo. Para evitar estes danos existem vários métodos que normalmente passam por adicionar aditivos à resina que confirmam proteção UV ou realizar uma pintura da estrutura com tinta que contenha essa mesma proteção UV.

8.1.1.2.Fatores biológicos

O material compósito caso seja formado por uma fibra de vidro e uma resina de epóxico, não é biodegradável o que não é muito positivo do ponto de vista ambiental mas também não está sujeito ao ataque de fungos, animais ou insetos.

8.1.1.3.Corrosão e Incêndios

A maior vantagem deste género de estruturas para autocarros é precisamente não sofrer do fenómeno de corrosão que afeta os congéneres metálicos. Sendo portanto uma excelente alternativa para ambientes onde a corrosão é particularmente intensa como é o caso das zonas regiões costeiras. Ora Portugal sendo um país com uma costa extensa (1230 km em Portugal continental, 667 km nos Açores, 250 km na Madeira onde incluem também as Ilhas Desertas, as Ilhas Selvagens e a Ilha de Porto Santo) uma carroçaria em materiais compósitos poderia beneficiar destas propriedades.

Embora a matriz polimérica do compósito seja inflamável, uma carroçaria realizada em materiais compósitos aditivados com proteção anti-fogo comporta-se bastante bem quando sujeita a uma situação de incêndio.

8.2. Técnicas de inspeção

Tal como em qualquer outro equipamento, este género de estrutura, necessita de um plano correto de inspeções periódicas que permitam averiguar qual o desgaste mecânico e estrutural que a carroçaria sofre ao longo do tempo.

Por razões que se tornam óbvias o uso de ensaios destrutivos após a instalação das carroçarias está fora de hipótese e como tal não serão tratados neste trabalho (como técnicas de manutenção) sendo apenas consideradas técnicas não destrutivas de análise de dano.

8.2.1. Ensaios não destrutivos

Analisando toda a gama de ensaios não destrutivos concluí-mos que nem todos poderiam ser aplicáveis, uma vez que alguns destes ensaios implicam a deslocação do autocarro para laboratório, o que é uma operação inviável economicamente. Desta forma, operações que envolvam análises por ultrassons e raios-X em grandes regiões da estrutura estão excluídas.

8.2.1.1. Tap Test

O “tap test” consiste num método de inspeção através da vibração do compósito quando sujeito a um “tap” (batimento) com um objeto, por exemplo metálico. A vibração produzida numa dada frequência determina o estado do material.

No caso de uma anomalia no material, o som deste irá ressoar de forma diferente, ou seja noutro tom e/ou frequência. Por exemplo uma zona afetada devido à delaminação das camadas do compósito quando feito o batimento, utilizando por exemplo uma moeda, irá emitir um som diferente e mais grave. O contrário acontecerá em zonas em que o material está em condições normais de funcionamento onde o som obtido será agudo.

Este método é um método muito pouco prático pois o inspetor terá de andar à procura de defeitos por toda a superfície do material, o que traduz numa inspeção morosa.

8.2.1.2. Inspeção visual

A inspeção visual é um método com bastante utilização a nível prático e que, apesar do seu grande defeito (apenas revela danos que ocorreram ao nível da superfície da superestrutura do autocarro), não pode nem deve ser subestimado. Este método ainda é, por exemplo, usado na indústria aeronáutica para comprovar a integridade das aeronaves. Realizar esta operação é bastante natural e de fácil execução necessitando apenas de ser realizada por um técnico qualificado com bastante experiência para que os resultados sejam fiáveis.

8.2.1.3. Inspeção combinada

Tal como seria de prever este exame é o resultado da combinação de um exame visual com o “tap test”. Primeiramente procura-se, através de uma inspeção visual, danos na superfície do elemento a testar e na sua pintura e em seguida, caso sejam encontrados danos, é realizado um “tap test” na zona de dano de forma a comparar o som obtido nessa zona com o obtido numa zona não danificada. Caso o som seja similar a integridade do autocarro não está afetada, logo a sua substituição não será, de momento, necessária.

9. Reciclagem

Os materiais compósitos reforçados por fibras são, por norma, uma mistura de materiais com diferentes propriedades o que torna complicada a sua reciclagem, pois, para além das fibras, são normalmente adicionadas cargas e aditivos que complicam o processo de reciclagem. A reciclagem de compósitos reforçados por fibras com base em termoplásticos deve, em teoria, ser mais fácil do que a reciclagem de compósitos baseados em termoendurecíveis, porque podem ser fundidos e subsequentemente novamente utilizáveis. Já para os materiais termoendurecíveis tal não é possível como já foi explicado anteriormente no capítulo referente a estes. Alguns polímeros termoendurecíveis, como o poliuretano, podem no entanto, facilmente, voltar ao seu monómero original. Isto pode revelar-se como uma vantagem para a utilização deste material na produção de autocarros em materiais compósitos.

Embora haja empresas em Portugal que façam a reciclagem de materiais compósitos utilizados para o fabrico de objetos comuns como garrafas e embalagens, por exemplo, não temos conhecimento de nenhuma empresa em Portugal que se dedique à reciclagem de materiais compósitos de aplicação estrutural embora estas já comecem a existir, segundo a FAPESP, no Brasil. Torna-se, portanto, complicado falar, neste momento, em reciclagem de materiais compósitos para aplicações estruturais. No entanto, acreditamos, que o mesmo seja possível no futuro, até porque já existem algumas técnicas para a realização deste processo. Atualmente estas técnicas são ainda muito dispendiosas o que as torna pouco lucrativas.

Dentro das técnicas existentes para reciclagem de materiais compósitos, vamos dar particular importância às utilizadas para reciclar termoendurecíveis reforçados por fibras. Havendo dois grandes tipos de reciclagem: a reciclagem mecânica e a reciclagem térmica.

9.1. Reciclagem mecânica

Esta técnica consiste em reduzir o tamanho das fibras que compõem o material compósito. Este processo inicia-se com o corte das fibras utilizando-se pequenas velocidades de corte, havendo ainda a possibilidade de retirar eventuais fragmentos de metal ou de outros materiais ainda presentes nesta fase.

Na segunda fase é utilizado um martelo de moagem para produzir fragmentos de fibra com tamanhos compreendidos entre 10 mm e 50 μ m.

Na fase final deste processo todos os componentes do compósito sofreram uma redução do seu tamanho, resultando desta operação uma mistura de diversos materiais com múltiplos tamanhos. Do resultado deste processo aparecem 3 grupos de partículas agrupadas pelo seu tamanho, as partículas de maiores dimensões são constituídas maioritariamente por fragmentos de fibra, as partículas mais pequenas que são constituídas fundamentalmente pela resina e ainda existem fragmentos mais pequenos que aparecem sob a forma de pó. Os pós resultantes do processo de reciclagem mecânica são vulgarmente utilizados como cargas. É comum serem usados para substituir o carbonato de cálcio na técnica de SMC ("Sheet Moulding Compounds"). Existem também alguns estudos e projetos que referem a utilização destes resíduos para reforço dos asfaltos utilizados na construção de infraestruturas rodoviárias.

9.2. Reciclagem térmica

Existem três processos, desenvolvidos e em fase de teste, dos quais fazemos, seguidamente, referência.

9.2.1. Combustão com recuperação de energia

Devido ao seu elevado poder calorífico (30.000 kJ/Kg) as resinas de base polimérica termoendurecível podem ser utilizadas como combustível. Para tornar o processo de obtenção de energia rentável é preciso ter em atenção a quantidade de fibra de vidro, pois como sabemos a fibra de vidro não arde e por isso não contribui para o processo de produção de energia. Terminada a combustão da resina os fragmentos de fibra resultantes podem ser utilizados como carga em cimentos.

9.2.2. Pirólise

O processo de pirólise é um processo químico de decomposição de materiais orgânicos através da utilização de calor na ausência de oxigénio. O processo de pirólise degrada a estrutura molecular do polímero em produtos derivados de petróleo, permitindo a reutilização das fibras uma vez que não são afetadas com o processo.

9.2.3. Processamento de leito fluidizado (“Fluidised bed processing”)

Este processo foi desenvolvido na Universidade de Nottingham, na Inglaterra ao longo da última década. Neste processo os bocados de compósito são dispersados sobre areia fluidizada (não havendo melhor tradução do termo em inglês “fluidised”) com ar quente. As temperaturas deste processo encontram tipicamente entre os 450 e os 550°C, a esta temperatura o termoendurecível transforma-se num material volátil e separa-se das fibras e dos outros componentes, como por exemplo as cargas. Depois os gases são separados e o resultado do polímero é queimado aproveitando-se a energia da sua queima. As fibras são reaproveitadas. O resultado desta reciclagem é um reciclado de fibra de alta qualidade que tem um potencial de reutilização em aplicações que requeiram o uso de pequenas fibras.

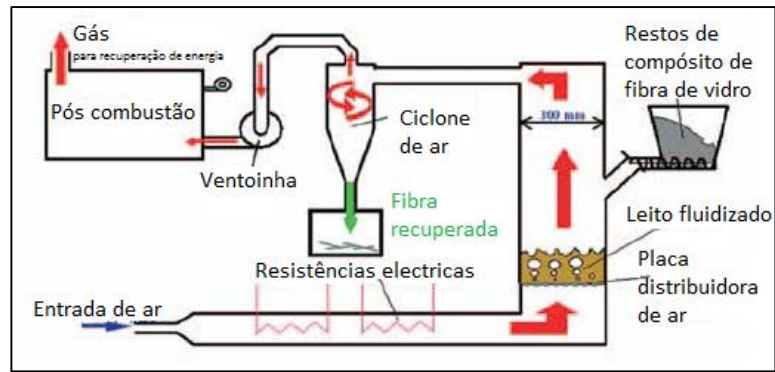


Figura 25. Esquema representativo do processamento de leito fluidizado, retirado de [13]

Esta técnica permite assim a reutilização das fibras de vidro, tendo a grande vantagem de poder ser utilizada qualquer que seja a mistura utilizada neste tipo de materiais mesmo que os compósitos possuam contaminantes.

10. Ciclo de vida

Para possibilitar às empresas o retorno do investimento efetuado é esperado que o autocarro tenha uma durabilidade compreendida entre 20 e 25 anos. Apesar de ser possível conceber um produto que apresente uma maior durabilidade, isso pode não ser vantajoso uma vez que um autocarro que apresenta hoje 20 anos já se encontra desfasado dos modelos novos existentes no mercado e espera-se que o mesmo se continue a passar no futuro.

Sabendo-se que os polímeros sofrem uma alteração das suas propriedades mecânicas em função das condições ambientais é conveniente, para assegurar a integridade física dos ocupantes da viatura, que durante o ciclo de vida do autocarro as propriedades dos polímeros utilizados se mantenham dentro de valores seguros. O cálculo da variação das propriedades mecânicas de um polímero ao longo do tempo é um assunto complexo para o qual ainda não existe uma solução única. A durabilidade de um componente depende da sua função na estrutura, das condições de carregamento, da duração de vida esperada e do sistema de materiais que é utilizado para a sua construção.

10.1. Análise do ciclo de vida do produto

O conceito de “ciclo de vida do produto” é usado com bastante regularidade e com bastantes significados diferentes.

Comercialmente o ciclo de vida do produto é o conjunto de etapas que compreende as fases de introdução, crescimento, maturidade e declínio de um produto. De uma forma genérica o ciclo de vida de um produto compreende todas as fases da vida do mesmo, desde o seu projeto até a sua retirada do mercado. Por vezes no ciclo de vida do produto estão incluídas etapas relativas a sua manutenção, mas geralmente não são tidas em consideração as fases de eliminação do produto.

As diferentes etapas do ciclo de vida têm por norma diferentes responsáveis, sendo, em geral o fabricante o responsável pelo *design*, produção e distribuição do produto. O consumidor faz uso do produto, existindo um terceiro interveniente responsável pela eliminação do mesmo.

10.2. Avaliação do ciclo de vida do produto [ACV] (Life Cycle Assessment LCA)

No processo de projeto quando se pretende a melhoria ambiental do produto, a avaliação dos resultados obtidos deve ser continua e distribuída por todas as fases do processo de *design* do produto. Ao longo de todo o

processo devem ser analisadas todas as alternativas que permitam satisfazer da melhor maneira os pressupostos ambientais, para tal são usadas ferramentas de cálculo que permitam quantificar o desempenho ambiental do produto em desenvolvimento.

Na atualidade a forma mais comum de avaliar o desempenho ambiental é utilizando a técnica de LCA.

A terminologia “avaliação do ciclo de vida” foi definida no artigo [29], como um processo objetivo de avaliar os encargos ambientais associados a um produto ou atividade através da identificação e quantificação da energia e materiais usados e os resíduos libertados para o meio ambiente. A avaliação do ciclo de vida pretende avaliar o produto tentando que sejam feitas alterações á sua conceção de maneira a melhorar o seu desempenho ambiental.

Esta avaliação incide sobre todo o ciclo de vida do produto, processo ou atividade tendo evoluído ao longo dos anos. A partir de 1997 foi padronizado segundo a norma ISO14040 [30] (norma integrada no conjunto de normas da série 14000 relativas a sistemas de gestão de qualidade).

10.3. Descrição Geral do processo de análise do ciclo de vida de um produto

A análise do ciclo de vida de um produto, de uma forma simplista consiste em compilar e analisar as entradas as saídas avaliando o impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida.

Podemos considerar que o “ciclo de vida” de um produto engloba a grande maioria das atividades efetuadas ao longo da sua existência desde a sua fabricação, á utilização, manutenção e deposição final. Neste estudo devem ser incluídos os custos inerentes á aquisição da matéria-prima indispensável para a fabricação do produto. Na próxima figura serão apresentadas as etapas prováveis de um ciclo de vida de um produto e as possíveis entradas e saídas medidas.

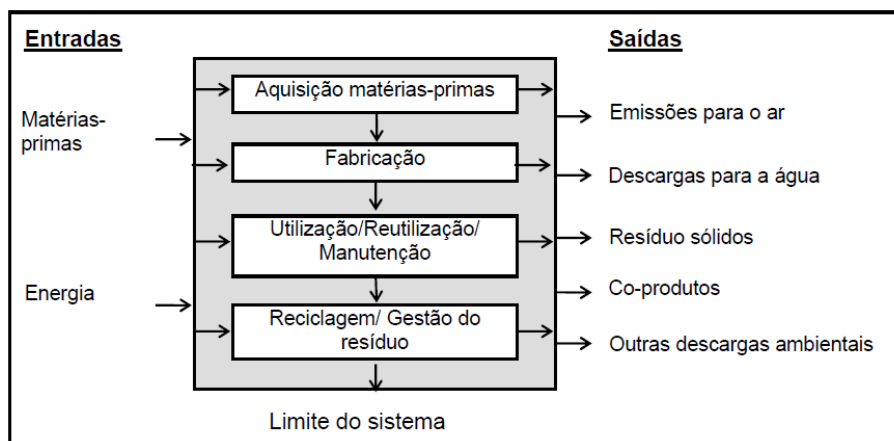


Figura 26 Etapas do ciclo de vida de um produto (retirado de [29])

Para realizar um trabalho sério num estudo ACV todas as extracções de recursos e emissões para o meio ambiente devem ser determinadas de uma forma quantitativa desde o nascimento até ao depósito do produto,

sendo com base nestes dados avaliados os impactos ambientais, na saúde humana e nos recursos naturais de um produto.

O processo de análise do ciclo de vida é composto por 4 momentos. Em um primeiro momento é necessário definir qual o âmbito e objetivos do projeto, posteriormente é necessário realizar um inventário dos materiais e processos necessários para a fabricação do mesmo, seguindo-se uma análise de impacto e por fim uma interpretação dos resultados obtidos.

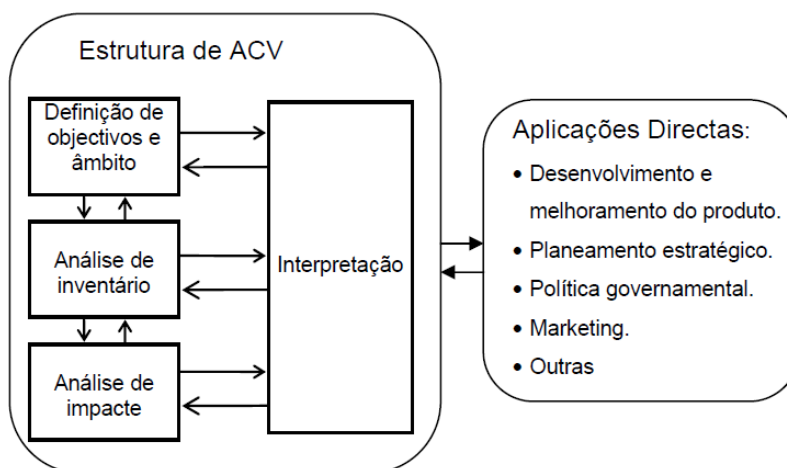


Figura 27 Etapas de uma análise ACV de acordo com a norma ISO14040:1997 [30]

Em seguida vamos de forma simplista tentar definir cada uma das etapas e quais suas funções na análise do ciclo de vida de um produto.

- **Definição do Âmbito e Objetivos do produto:** Nesta fase procede-se á descrição do produto, do processo ou atividade. Estabelecendo-se o contexto na qual a avaliação pode ser feita e identifica-se os limites ambientais a serem revistos na avaliação;
- **Análise de Inventário:** Neste item pretende-se quantificar a energia, a água e os materiais utilizados e as conseqüentes descargas ambientais;
- **Análise dos impactos:** Analisa os efeitos humanos e ecológicos da utilização da energia, água e materiais. Quantifica as descargas ambientais identificadas na análise de inventário;
- **Interpretação:** Avalia os resultados da análise de inventário e análise de impacto para seleccionar qual a melhor forma de obter o produto pretendido.

10.4. Benefícios e limitações da implementação de uma eficaz análise do ciclo de vida

Tendo os decisores em seu poder uma análise do ciclo de vida do produto, aliadas às informações relativas aos custos podem realizar uma melhor escolha e seleção dos produtos e processos para que sejam reduzidos os impactos ambientais decorrentes da produção e comercialização do produto.

Ao facto anteriormente referido podemos acrescentar que a análise do ciclo de vida do produto é a técnica que melhor permite identificar e quantificar a transferência de impactos ambientais entre dois meios (por exemplo: a eliminação de emissões atmosféricas pode ser feita à custa do aumento das emissões de efluentes líquidos) e entre duas etapas do ciclo de vida do produto (p. ex., da fase de aquisição de matérias-primas para a fase de utilização das mesmas).

Na prática, quando se realiza uma seleção entre 2 produtos concorrentes, podemos incorrer num enorme erro se considerarmos que uma opção é melhor que a outra só porque necessita de uma menor quantidade de matéria-prima. Pois realizada uma cuidada análise ao ciclo de vida do produto podemos chegar a uma conclusão inversa, pois a opção que necessita de uma maior quantidade de matéria-prima pode ser aquela que necessita de uma menor quantidade de energia para ser processada tornando-se assim mais barata e portanto sendo a melhor opção. Como podemos facilmente perceber se não fosse realizada uma ACV não seria fácil chegar a esta mesma conclusão.

De acordo com a USEPA[29] os pesquisadores quando realizam uma análise ao ciclo de vida de um produto devem:

- Desenvolver um sistema que permita a avaliação das consequências ambientais associadas a um dado produto;
- Analisar os balanços (ganhos/perdas) ambientais associados com um ou mais produtos/processos específicos de modo a que os visados (estado, comunidade, etc.) aceitem uma ação planeada;
- Quantificar as descargas ambientais para o ar, água, e solo relativamente a cada estágio do ciclo de vida e/ou processos que mais contribuem para as mesmas;
- Avaliar os efeitos humanos e ecológicos do consumo de materiais e descargas ambientais para a comunidade local, região e o mundo;
- Comparar os impactos ecológicos e na saúde humana entre dois ou mais produtos/processos rivais, identificando os impactos de um produto ou processo específico;
- Identificar impactos em uma ou mais áreas ambientais específicas de interesse.

Uma das principais limitações do processo de ACV é necessitar de um elevado número de recursos quer humanos quer materiais não produzindo resultados que sejam visíveis de uma forma imediata para a empresa. Um estudo ACV acaba por não determinar qual o processo que é mais caro ou o que funciona melhor. Desta forma a informação contida num estudo deste género deve ser utilizada como uma parte importante da decisão em conjunto com o custo e a performance do componente a produzir.

11. Legislação e Requisitos Legislativos

Para que seja possível colocar o veículo em circulação é necessário que este se encontre de acordo com algumas normas e regulamentos. Ora como se prevê que o autocarro circule em Portugal e na Europa regemo-nos pelas normas europeias [2] e na sua transposição legal para a lei portuguesa [1].

Antes de proceder com a definição dos requisitos legislativos é altura de esclarecer alguns conceitos:

- Superestrutura: são as partes do veículo responsáveis pela sua resistência em caso de capotamento;
- Secção da carroçaria: é uma secção que contenha pelo menos 2 pilares verticais idênticos de cada lado e que é representativo de uma ou mais partes da estrutura do veículo;
- Energia total: é a energia que se considera poder ser absorvida pela estrutura do veículo.

11.1. Determinação do espaço residual

O espaço residual encontra-se definido no anexo IV da diretiva 2001/85/CE como sendo o volume que no decorrer dos ensaios não pode ser penetrado pela estrutura da carroçaria. Durante os ensaios nenhum elemento dentro do volume residual pode sair da estrutura deformada. Estas normas são aplicadas a todo o veículo incluindo todas as partes estruturais, membros, painéis e todas as partes rígidas, como prateleiras para depósito de bagagens, equipamento de ventilação, etc... Nesta análise não são tidos em consideração os elementos de reforço da estrutura, nem bares e casas de banho caso existam. Em termos geométricos, de acordo com anexo IV da diretiva 2001/85/CE o espaço residual é o volume definido no compartimento de passageiros ao movimentar-se em linha reta o plano transversal vertical para que o ponto "R" do banco lateral de passageiro mais avançado, passando este trajeto por todos os bancos laterais intermédios. O ponto "R" de cada banco encontra-se situado a uma altura de 500 milímetros acima do piso do veículo, a 300 milímetros da face interior da parede lateral e a 100 milímetros á frente do encosto do banco correspondente, no eixo médio do banco lateral em questão.

1(a) Corte transversal

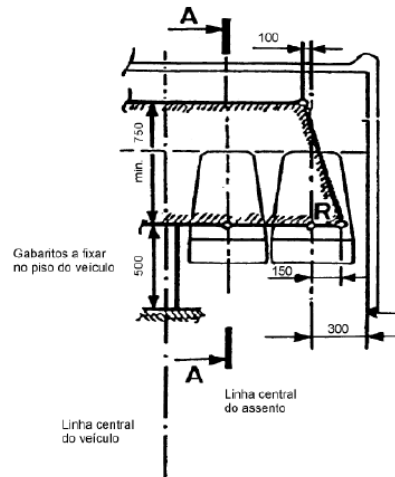


Figura 28 Imagem representativa do espaço residual em corte transversal, retirado de [1]

1(b) Corte longitudinal

Secção A-A do veículo segundo o plano vertical que passa nos eixos médios dos bancos interiores.

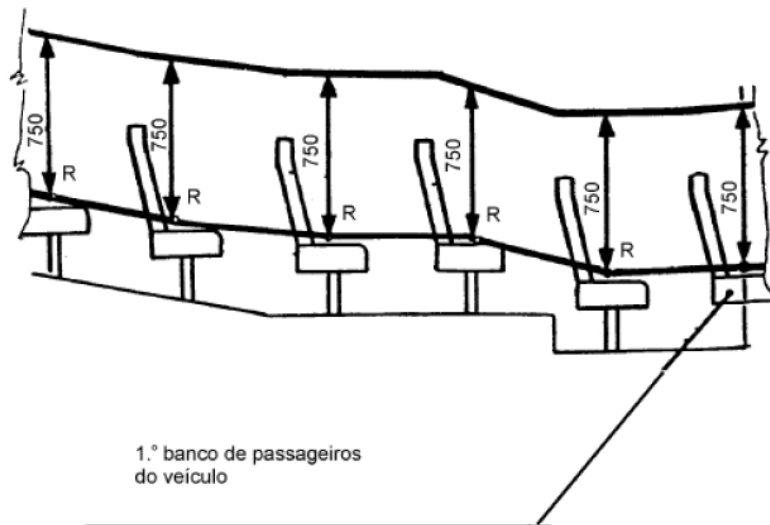


Figura 29 Imagem representativa do espaço residual em corte longitudinal, retirado de [1]

11.2. Estabilidade

De acordo com o anexo I da diretiva 2001/85/CE a estabilidade de um veículo de transporte de passageiros deve ser tal que o ponto a partir do qual ocorre o capotamento da viatura não seja ultrapassado se a superfície sobre o qual se encontra o veículo for inclinada para ambos os lados, de forma alternada numa amplitude de 28° em relação à horizontal.

Para este ensaio, e também para todos os outros, a massa do autocarro é a massa em ordem de marcha. Ora essa massa mede-se com o veículo vazio ao qual se soma uma massa de 75 Kg correspondente á massa do condutor, uma massa equivalente a 90% da capacidade máxima do depósito de combustível especificada pelo fabricante do chassis, a massa dos líquidos refrigerantes, dos lubrificantes, das ferramentas e da roda suplente caso exista.

Ao peso do veículo em ordem de marcha deve ainda ser somado o valor das cargas Q, como o definido no ponto 7.4.3.3.1 do anexo I da diretiva 97/27/CE [31], colocadas no lugar de cada passageiro. Caso o veículo se destine ao transporte de pessoas em pé os centros de gravidade das cargas Q ou dos 75 kg que as representam devem estar uniformemente distribuídos pela zona destinadas a esses passageiros a uma altura de 875 milímetros. Caso seja possível que o veículo transporte carga sobre o tejadilho, de acordo com o ponto 7.4.3.3.1 do anexo I da diretiva 97/27/CE [31], esta deve ser adicionada ao peso do veículo em ordem de marcha sendo uniformemente distribuída e não inferior á especificada pelo fabricante.

Caso o veículo disponha de uma lotação que é variável em lugares em pé e lugares sentados, ou esteja, preparado para o transporte de pessoas em cadeiras de rodas, na área em que ocorram essas variações de carga, a carga a usar de acordo com o ponto 7.4.2.1 deve ser a maior das seguintes:

- Massa representativa do número de passageiros de pé que podem ocupar a área em questão; ou massas das cadeiras de rodas, com os respetivos utilizadores, que podem ocupar a área em questão, à razão de 250 kg cada, colocadas a uma altura de 500 mm acima do piso, no centro de cada espaço destinado a uma cadeira de rodas; ou massa dos passageiros sentados, dos passageiros de pé e dos utilizadores de cadeiras de rodas, e de qualquer combinação destes que possa ocupar a área em questão;
- Massa representativa do número de passageiros sentados que podem ocupar a área em questão, incluindo a massa dos eventuais bancos desmontáveis;

A altura dos degraus, que eventualmente são necessários para impedir o deslizamento lateral das rodas no equipamento utilizado para o ensaio, não deve ser superior a dois terços da distância entre a superfície em que o veículo se encontra imobilizado antes de ser sujeito ao ensaio e a parte da jante mais próxima dessa superfície quando o veículo estiver carregado.

Para que o ensaio seja válido não poderá ocorrer contacto de qualquer género entre qualquer parte do veículo não destinado a entrar em contacto em situação de utilização normal. Simultaneamente o veículo não poderá sofrer qualquer avaria ou dano.

Como alternativa ao dispendioso processo de ensaio prático de estabilidade, poderá ser realizado um ensaio teórico que através de cálculos demonstre que o veículo não sofre capotamento nas condições descritas nos pontos anteriormente referidos.

Para o processo de cálculo o legislador manda ter em consideração os seguintes parâmetros:

- Massa e dimensões do veículo;
- Altura do centro de gravidade do veículo;
- Flexibilidade das suspensões;
- Características da regulação automática da suspensão pneumática;
- Posição do centro dos momentos;
- Resistência da carroçaria á torção.

A descrição exata do processo de cálculo encontra-se estabelecida no apêndice 1 do anexo I da diretiva 2001/85/CE. Para além deste método de cálculo a empresa produtora do autocarro pode sugerir outros métodos. No entanto, estes têm de ser aprovados e certificados pelo serviço técnico responsável pelos ensaios. Estes mesmos serviços técnicos têm ainda legitimidade para pedir a realização de ensaios práticos em certas zonas específicas de forma a garantir o rigor do processo de cálculo.

Para todo o processo de cálculo é necessário considerar a forma tridimensional do autocarro.

Como a elevação dos eixos num dos lados da carroçaria resultante da aceleração lateral não é simultânea, devido às diferentes flexibilidades da suspensão, dos pneus e da posição do seu centro de gravidade, é necessário garantir que as rodas do ou dos outros eixos estão assentes no solo.

Para poder simplificar o processo de cálculo indica-se que o centro de gravidade das massas não suspensas situadas no plano longitudinal do veículo, mais especificamente na reta que passa pelo eixo de rotação das rodas. Podendo também ser desprezado para efeito de cálculo, um pequeno desvio do centro de rolamento existente devido á deflexão do eixo. O sistema de comando da suspensão pneumática não será considerado.

Os parâmetros que são tidos em consideração são no mínimo os seguintes:

- Posição do centro de gravidade do veículo;
- Distância entre eixos;
- Largura dos pneumáticos;
- Massas suspensas e não suspensas;
- A contração, o alongamento e a flexibilidade do veículo e ainda a sua não linearidade;
- A elasticidade horizontal e vertical dos pneumáticos;
- Torção da carroçaria;
- Posição do centro de rolamento dos eixos.

11.3. Energia absorvida

A diretiva 2001/85/CE mais especificamente o subapêndice 1 do apêndice 3 ao anexo IV estabelece um método de cálculo para a energia total dissipada pelo autocarro que posteriormente será utilizada nas simulações.

Para que seja possível o cálculo da energia absorvida têm de ser admitidas as seguintes hipóteses:

- A secção transversal da carroçaria tem uma forma retangular;
- A suspensão do veículo encontra-se fixada de forma rígida;
- Considera-se que o movimento da secção da carroçaria é uma rotação completa sobre um ponto.

Se o centro de gravidade (h) for determinado por métodos gráficos, o cálculo da energia total Absorvida (E^*) é dado pela seguinte equação:

$$E^* = 0.75 Mgh[N.m] \quad (eq.5)$$

De forma alternativa também pode ser utilizada a seguinte equação:

$$E^* = 0.75 Mg \left(\sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 + H_s} - \frac{W}{2H} \sqrt{(W)^2 + 0.8^2} + \frac{H_s}{H} \right) [N.m] \quad (eq. 6)$$

Em que:

- M é a massa em ordem de marcha do veículo em Kg;
- G é uma constante igual 9.81 m/s² correspondente á aceleração da gravidade;
- W corresponde á largura máxima do veículo em metros;
- H_s é a altura do centro de gravidade do veículo com o peso em ordem de marcha em kg;
- H é a altura do veículo em metros.

No respeitante á absorção de energia por parte da superestrutura deverá ser também tido em consideração o subapêndice 2 ao apêndice 3 do anexo IV da mesma diretiva.

Para situações em que duas secções não sejam idênticas, mas muitas das suas características estruturais sejam iguais, serão aceites os dados relativos ao ensaio da primeira secção como válidos para a segunda secção. O fabricante tem ainda a obrigação de especificar perante o serviço técnico de inspeção quais são os pilares da superestrutura que considera para a resistência da mesma e também a energia (E_i) que está previsto que cada montante seja capaz de absorver.

Para que o autocarro possa ser aprovado tem que cumprir com os seguintes critérios:

- $\sum_{i=1}^{i=m} E_i > E^*$ (eq. 7)
- $\sum_{i=1}^{i=n} E_{iF} \geq 0.4E^*$ (eq. 8)
- $\sum_{i=1}^{i=p} E_{iR} \geq 0.4E^*$ (eq. 9)
- $L_F \geq 0.4 l_f$ (eq. 10)
- $L_R \geq 0.4 l_f$ (eq. 11)
- $\frac{d_{max}}{d_{min}} \leq 2.5$ (eq. 12)

Esta condição apenas é válida quando d_{máx} for 0.8 vezes superior á deformação máxima permitida sem invasão do espaço residual.

$$L_F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (E_{iF} \cdot l_{iF})}{\sum_{i=1}^{i=n} (E_{iF})} \quad (eq. 13)$$

$$L_R = \frac{\sum_{i=1}^{i=p} (E_{iR} \cdot l_{iR})}{\sum_{i=1}^{i=p} (E_{iR})} \quad (eq. 14)$$

Em que:

- m é o número total de pilares indicado pelo fabricante;
- n é o número de pilares situados á frente do centro de gravidade do veículo;
- p é o número de pilares situados a traz do centro de gravidade;
- E_i é a quantidade de energia que pode ser absorvida pelo montante i da superestrutura;

- E_{IF} é a quantidade de energia que pode ser absorvida pelo montante i situado á frente do centro de gravidade do veículo;
- E_{IR} é a quantidade de energia que pode ser absorvida pelo montante i situado á retaguarda do centro de gravidade do veículo;
- $d_{m\acute{a}x}$ é a maior deformação medida na direção do impacto numa das secções da carroçaria depois de absorvida a energia correspondente ao que é indicado pelo fabricante;
- $d_{m\acute{i}n}$ é a menor deformação medida na direção do impacto (no mesmo ponto do espaço entre pilares que para $d_{m\acute{a}x}$) numa das secções da carroçaria depois de absorvida a energia correspondente ao considerado pelo fabricante;
- l_{IF} é a distância do centro de gravidade do veículo ao montante i situado para a frente do centro de gravidade;
- l_{IR} é a distância do centro de gravidade do veículo ao montante i situado para a retaguarda do centro de gravidade;
- L_F é a distância do centro de gravidade do veículo à face dianteira do mesmo;
- L_R é a distância do centro de gravidade do veículo à face traseira do mesmo.

11.4. Resistência da superestrutura

Para ser possível comprovar a resistência da estrutura de um modelo de veículo, uma marca deve sujeitar esse modelo a qualquer um dos seguintes métodos ou a um método alternativo que tenha sido aprovado pelas autoridades competentes.

Os métodos de ensaio estabelecidos são os seguintes:

1. Ensaio de capotamento como o descrito no anexo IV, apêndice 1 da diretiva 2001/85/CE;
2. Ensaio de capotamento de uma ou mais secções da carroçaria que sejam representativas do veículo completo de acordo com o apêndice 2 do mesmo anexo e da mesma diretiva;
3. Ensaio com o auxílio de um pêndulo sobre uma ou mais secções da carroçaria tal como o que se encontra descrito no apêndice 3 da diretiva;
4. Verificação da resistência da superestrutura por aplicação de um processo de cálculo tal como o descrito no apêndice 4 da diretiva.

Para situações em que os modelos 2, 3 e 4 não permitam que sejam tidos em conta diferenças importantes registadas entre duas secções de veículo (por exemplo quando existe um equipamento de ar condicionado no tejadilho), devem ser propostos ao serviço técnico de inspeção cálculos ou métodos de ensaios complementares. Quando não é possível obter esses dados, pode ser exigido que o veículo seja ensaiado de acordo com o método descrito no ponto 1.

Quando apenas são ensaiadas secções do veículo e não o veículo completo, este deve satisfazer todas as condições especificadas ao longo do subapêndice 3 do apêndice 3 do anexo IV da norma 2001/85/CE que faz referência aos requisitos aplicáveis á distribuição das partes principais da superestrutura do veículo no que diz respeito á absorção de energia.

11.4.1. Ensaio de capotamento de um veículo completo

Tal como já tivemos oportunidade de referir o ensaio de capotamento de um veículo completo encontra-se descrito no apêndice A do anexo IV da diretiva 2001/85/CE, sendo neste apêndice inteiramente definidas as condições em que devem ser desenvolvidos os ensaios. Para que seja possível realizar este ensaio não é necessário que o veículo se encontre na sua fase final de acabamento, basta apenas um protótipo do mesmo que tenha a mesma massa em ordem de marcha, centro de gravidade e a distribuição de pesos declarada pelo fabricante. Quando o veículo permite que sejam regulados os bancos, estes devem estar regulados na sua máxima altura e numa posição que os coloque o mais próximo possível da vertical. As portas e janelas têm de estar fechadas mas não trancadas e podem ser substituídas por massas equivalentes desde que colocadas nas posições apropriadas.

Os pneus devem de estar á pressão indicada pelo fabricante. Para veículos que disponham de um sistema pneumático de suspensão este deve estar a funcionar. Quando os veículos disponham de sistemas de nivelção automático este deve ser regulado no nível especificado pelo fabricante com o veículo colocado sobre uma superfície horizontal plana. Os amortecedores devem estar no seu estado normal de funcionamento.

Todos os combustíveis, produtos explosivos e corrosivos devem de ser substituídos por outros produtos desde que sejam garantidas as condições descritas no ponto 1.1 do apêndice 1 do anexo IV da diretiva.

A zona de impacto deve ser construída em betão ou em outro qualquer material que seja rígido.

O ensaio deve decorrer como o demonstrado na figura.

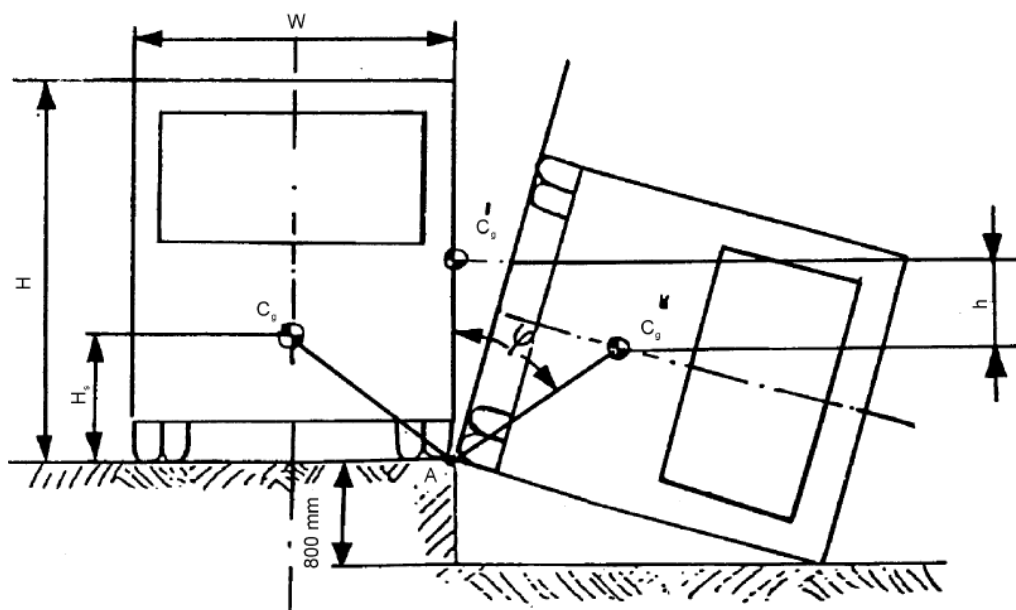


Figura 30 Imagem representativa do ensaio de capotamento total da viatura, retirado de [1]

Durante o ensaio o veículo é colocado numa plataforma, sendo seguidamente obrigado a capotar para um dos lados. O lado para o qual o veículo sofre o capotamento deve ser previamente especificado pelo fabricante.

Para que o ensaio possa ser validado pela autoridade competente a posição do veículo no início do ensaio deve ser a seguinte:

- O eixo de rotação do veículo seja paralelo ao seu eixo longitudinal;
- O eixo de rotação diste entre 0 e 200 milímetros da face vertical do degrau entre os dois níveis;
- O eixo de rotação diste entre 0 e 100 milímetros para baixo, do plano horizontal no qual os pneumáticos se encontram inicialmente apoiados;
- O eixo de rotação diste 0 a 100 mm da face exterior do pneu, no eixo mais largo;
- O desnível entre o plano horizontal de partida e o plano horizontal inferior no qual tem lugar o impacto não pode ser inferior a 800 milímetros.

Utilizando os meios que se achem apropriados deve ser garantido que o autocarro não sofre um deslocamento sobre o eixo longitudinal. O deslizamento lateral no sentido do capotamento também deve ser restringido. O equipamento de ensaio deve ser capaz de garantir uma elevação simultânea dos eixos do veículo sendo o veículo inclinado até capotar sem balanços a uma velocidade que não pode ser superior a 5°/segundo.

Para verificar que a zona de espaço residual não é afetada, ou seja que não é invadida ou invade a estrutura deformada do veículo, são utilizadas câmaras de alta velocidade, gabaritos deformáveis ou outros meios que se julguem necessários. Esta verificação deve ser realizada em pelo menos duas zonas da viatura (por norma uma na zona dianteira e outra na zona traseira do compartimento de passageiros) cuja localização exata fica ao critério do serviço técnico da entidade responsável pelo ensaio. Caso se opte pela utilização de gabaritos deformáveis estes devem de ser fixados em zonas praticamente indeformáveis da viatura.

11.4.2. Ensaio de capotamento de uma secção da carroçaria

O ensaio de capotamento de uma secção da carroçaria do autocarro encontra-se definido no anexo IV apêndice 2 da diretiva 2001/85/CE.

A secção da carroçaria que se pretende ensaiar deve ser representativa de uma secção do veículo sem carga, da sua geometria, do eixo de rotação e de gravidade nas direções vertical e transversal da carroçaria. O fabricante deve fornecer a massa da secção a ensaiar em percentagem da massa total do veículo em ordem de marcha e a percentagem da energia total dissipada que se espera que a secção absorva .

A percentagem da energia total dissipada referida no ponto 1.4 deste anexo não deve ser inferior á percentagem da totalidade da massa do veículo em ordem de marcha total referida no ponto 1.3.

As condições em que o ensaio se deve realizar encontram-se especificadas no ponto 1.6 do apêndice 1 e nos pontos 2.1 a 2.6 do apêndice 3.

O método de ensaio é idêntico ao descrito no apêndice 1, com a diferença de que, em vez do veículo completo, se utiliza a secção da carroçaria acima referida.

11.4.3. Ensaio com um pêndulo de uma secção da carroçaria

O ensaio com um pêndulo sobre uma secção da carroçaria encontra-se definido no apêndice 3 ao anexo IV da diretiva 2001/85/CE.

Segundo este apêndice a energia transmitida a uma determinada secção da carroçaria deve ser a soma das energias declaradas pelo fabricante para cada um dos arcos transversais de reforço que formam a secção da carroçaria em questão.

Utilizando um pêndulo, aplicar-se-á à secção de carroçaria em questão a fracção apropriada da energia prevista no subapêndice 1 do presente apêndice 3, de modo que, no momento do impacto, o ângulo da direcção de movimento do pêndulo com o plano médio vertical de orientação longitudinal da referida secção de carroçaria seja de 25° (+ 0° - 5°). O fabricante deve especificar o ângulo exato dentro do intervalo de variação admitido.

Para poder ser considerado válido o ensaio têm de ser cumpridos os requisitos expostos ao longo do ponto 3.1 do apêndice 3 da diretiva.

A parte submetida ao ensaio tem de estar de acordo com o especificado pelo fabricante e em iguais condições as exigidas para o ensaio de capotamento total da viatura.

O pêndulo deve ser largado de uma altura que lhe permita embater na secção da carroçaria a uma velocidade entre 3 e 8 m/s.

A superfície de impacto do pendulo deve ser de aço, ou de contraplacado com $20\text{mm} \pm 5\text{ mm}$ de espessura e a massa do pêndulo deve estar uniformemente distribuída.

A superfície da zona de impacto deve possuir uma forma retangular e a sua largura não deve inferior á largura da secção da carroçaria em ensaio. A altura não deve ser inferior a 800 milímetros e deve apresentar os ângulos arredondados. O corpo do pêndulo deve estar firmemente ligado a 2 barras rígidas não podendo o eixo destas barras distar mais de 3.5 metros do centro geométrico do pêndulo.

11.4.4. Verificação da resistência da superestrutura por aplicação de um método de cálculo

A verificação da resistência de uma superestrutura utilizando um método de cálculo encontra-se definido no apêndice 4 do anexo IV da diretiva 2001/85/CE. Para a estrutura ser aprovada a estrutura precisa de estar de acordo com os requisitos especificados no ponto 3.1 do referido anexo.

O método de cálculo apenas tem que ser aprovado pelo serviço técnico responsável pela realização do ensaio. Caso se preveja que a estrutura venha a estar sujeita a deformações que excedam o limite de elasticidade dos materiais utilizados, os cálculos devem simular o comportamento da estrutura quando sujeita a grandes deformações plásticas. Para verificar as hipóteses que são assumidas durante o processo de cálculo a entidade responsável pelos ensaios pode exigir o ensaio de determinados elementos de união ou partes específicas da estrutura da viatura.

Para que seja possível ser aplicado este método é necessário definir primeiramente um modelo matemático que defina a estrutura. O processo de análise da estrutura para definição de um modelo matemático tem de ser capaz de identificar os pontos onde ocorrerá uma possível articulação plástica, qual a velocidade de deformação da estrutura e qual a tensão dinâmica correspondente a essa velocidade. Mais uma vez se o modelo obtido não for capaz de prever fraturas importantes, pode ser necessário prever experimentalmente ou através de análises apropriadas a ocorrência de tais fraturas. Para este ensaio é necessário indicar a distribuição das cargas ao longo do comprimento do veículo. O método tem de ter em conta as deformações até aos limites elásticos dos respetivos materiais constituintes da estrutura.

O método terá ainda de ter em consideração possíveis modificações que têm lugar na geometria, pelo menos quando as deformações passam os limites aceitáveis. Os cálculos devem simular a energia e a direção do impacto a que superestrutura estaria sujeita caso fosse submetida ao ensaio completo de capotamento. A validade do método deverá ter sido comprovada por comparação com os resultados de ensaios reais não sendo indispensável que estes tenham sido efetuados.

12. Critérios de Rotura de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica

Tal como sabemos, de uma forma geral, o critério de Von Mises não se adequa á análise da rotura de materiais compósitos. Sabendo-se que a análise da rotura deste tipo de material é mais complexa do que a análise da rotura em materiais isotrópicos, tivemos de estudar outros critérios que apresentaremos seguidamente.

Critérios específicos para a análise da rotura em materiais compósitos têm como função prever a rotura da estrutura do laminado. Esta rotura ocorre essencialmente devido a 4 fenómenos que são:

- Rotura das fibras ou da matriz do compósito;
- Problemas relacionados com a descoesão entre a estrutura da matriz e a estrutura das fibras;
- Fenómenos de delaminação.

Os critérios então estabelecidos podem ser enquadrados em três grupos:

- Critério da tensão máxima e critério da deformação máxima;
- Critérios interativos nos quais se incluem uma versão revista do critério de Von Mises, o critério de Hill, o critério de Hoffman e o critério de Tsa-Wu;
- Critérios de rotura baseados na resistência.

Dentro dos critérios de rotura analisados decidimos aprofundar o nosso estudo nos critérios de rotura baseados em critérios de resistência dos materiais, uma vez que de forma genérica são os mais utilizados pelos programas de simulação quando se tratam de estruturas em materiais compósitos.

12.1. Critérios de rotura baseados na resistência

Para tornar possível a previsão da rotura em materiais compósitos normalmente são utilizados critérios de rotura baseados na resistência. Para tal é vulgar a utilização do método dos elementos finitos. Ao longo dos anos e com o aumento do poder de cálculo dos meios computacionais foram desenvolvidos critérios cada vez mais complexos que procuram estabelecer uma correlação entre os resultados obtidos em ensaios práticos e os resultados das simulações.

Seguidamente serão apresentados alguns desses critérios.

12.1.1. Critério de Falha LaRC03 [32]

O critério de falha LaRC03 é baseado nos conceitos propostos por Hashin (1980) e no plano de fratura proposto por Puck e Schurmann (1998). O ângulo de fratura é calculado usando a tensão efetiva de Morh-Coulomb.

O critério LaRC03 pode ser resumido em seis índices de falha, cada um baseado em um diferente tipo de falha micro-estrutural. Uma vez que os modos de falha se devem a mecanismos diferentes, estes índices de falha não são relacionados de maneira explícita entre si.

As propriedades que necessitam ser obtidas experimentalmente são E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} , X^T , X^C , Y^T , Y^C , S^L , $G_{Ic(L)}$, $G_{IIc(L)}$, onde X^T e X^C são, respetivamente, os limites de resistência longitudinais de tração e compressão. Y^T , Y^C , são respetivamente, os limites de resistência transversais de tração e compressão e S^L é o limite de resistência ao corte da matriz na direção longitudinal às fibras. De acordo com Davila et al. [33], as tenacidades à fratura em modo I e II, representadas respetivamente por $G_{Ic(L)}$ e $G_{IIc(L)}$, podem ser obtidas em ensaios padronizados de mecânica da fratura.

Os índices de falha do critério LaRC03 podem ser divididos em dois grupos. Um dos grupos prevê a falha da matriz e o outro grupo prevê a falha da fibra.

Para a falha da matriz, os índices de falha do critério LaRC03 são dados por:

Se $\sigma_{22} \geq 0$ (a matriz encontra-se sujeita a um esforço de tração):

$$FI_M = (1 - g) \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_{is}^T} \right) + g \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_{is}^T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{is}^T} \right)^2 \quad (eq. 15)$$

Onde, $g = \frac{G_{Ic(L)}}{G_{IIc(L)}}$ (eq. 16) para lâminas finas e $g = 1.12^2 \frac{\Lambda_{22}^0}{\Lambda_{44}^0} \left(\frac{Y^T}{S^T} \right)^2$ (eq. 17) para todos os outros tipos de laminas existentes. O sub-índice "is" é o valor da propriedade no local (*in situ*), que neste caso, é diferente da obtida experimentalmente (valor da propriedade global). Os valores locais são dados por:

$$Y_{is}^T = \sqrt{\frac{8G_{Ic(L)}}{\pi\Lambda_{22}^0}} \quad (eq. 18)$$

$$S_{is}^L = \sqrt{\frac{8G_{IIc(L)}}{\pi t \Lambda_{22}^0}} \quad (eq. 19)$$

$$\Lambda_{22}^0 = 2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{\nu_{21}^2}{E_1} \right) \quad (eq. 20)$$

$$\Lambda_{44}^0 = \left(\frac{1}{G_{12}} \right) \quad (eq. 21)$$

- Se $\sigma_{22} < 0$ então a matriz está sujeita a um esforço compressivo:

$$FI_M = \left(\frac{\tau_{eff}^{mL}}{S^T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{eff}^{mL}}{S_{is}} \right)^2 \quad (eq. 22)$$

Para $\sigma_{11} < Y^C$

$$FI_M = \left(\frac{\tau_{eff}^T}{S^T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{eff}^L}{S_{is}} \right)^2 \quad (eq. 23)$$

Para $\sigma_{11} > Y^c$, onde

$$\begin{cases} \tau_{eff}^T = -\sigma_{22} \cos \alpha (\sin \alpha - \eta^T \cos \alpha) \\ \tau_{eff}^L = \cos \alpha (|\tau_{12}| + \eta^T \sigma_{22} \cos \alpha) \end{cases} \quad (eq. 24)$$

Para a quebra da fibra, os índices de falha do critério LaRC03 são dados por:

- Se $\sigma_{11} \geq 0$ (a fibra está sob tração):
 - $FI_F = \left(\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{T1}} \right) \quad (eq. 25)$

Onde ε_{11} é a deformação do material na direção da fibra e ε_{T1} é a deformação em que ocorre a falha do material quando o mesmo é solicitado na direção da fibra.

- Se $\sigma_{11} < 0$ então a matriz está sujeita a um esforço compressivo :

$$FI_F = \left(\frac{|\tau_{12}|^m + \eta^L \sigma_{22}^m}{S_{is}^T} \right) \quad (eq. 26)$$

Para $\sigma_{22} < 0$ e

$$FI_F = (1 - g) \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_{is}^T} \right) + g \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_{is}^T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{is}^T} \right)^2 \quad (eq. 27)$$

Para $\sigma_{22} \geq 0$, onde:

$$\sigma_{11}^m = (\cos \phi)^2 \sigma_{11} + (\sin \phi)^2 \sigma_{22} + 2 \sin \phi \cos \phi \tau_{12} \quad (eq. 28)$$

$$\sigma_{22}^m = (\sin \phi)^2 \sigma_{11} + (\cos \phi)^2 \sigma_{22} + 2 \sin \phi \cos \phi \tau_{12} \quad (eq. 29)$$

$$\tau_{12}^m = -\sin \phi \cos \phi \sigma_{11} + \sin \phi \cos \phi \sigma_{22} + ((\cos \phi)^2 - (\sin \phi)^2) \tau_{12} \quad (eq. 30)$$

O ângulo ϕ é dado por:

$$\phi = \frac{|\tau_{12}| + (G_{12} - X^c) \phi^c}{G_{12} + \sigma_{11} - \sigma_{22}} \quad (eq. 31)$$

$$\phi^c = \tan^{-1} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \left(4 \frac{S_{is}^L}{X^c} + \eta^L \right) \left(\frac{S_{is}^L}{X^c} \right)}}{2 \left(\frac{S_{is}^L}{X^c} + \eta^L \right)} \right) \quad (eq. 32)$$

O limite de resistência ao corte da matriz na direção transversal às fibras é dado por:

$$S^T = Y^c \cos \alpha_0 \left(\sin \alpha_0 + \frac{\cos \alpha_0}{\tan 2\alpha_0} \right) \quad (\text{eq. 33})$$

As outras variáveis são:

$$\eta^T = \frac{-1}{\tan 2\alpha_0} \quad (\text{eq. 34})$$

$$\eta^L = \frac{S_{is}^L - \cos 2\alpha_0}{Y^c (\cos \alpha_0)^2} \quad (\text{eq. 35})$$

$$\text{e } \alpha_0 = 53^\circ$$

12.1.2. Critério Hashin

O critério de Hashin [34] nas suas duas formulações baseia-se necessariamente no estudo dos mecanismos de falha dos materiais em análise. Assim sendo, existem duas propostas de critérios feitas por Hashin. A primeira de compreensão mais simples data de 1973 denomina-se Critério de Hashin e Roten estuda o dano para um estado biaxial de tensões. O segundo critério mais complexo é de 1980 e estuda o dano num estado triaxial de tensões, que quando particularizado para duas dimensões não conduz aos mesmos resultados do critério de Hashin e Roten.

Os fundamentos para os critérios de Hashin são os seguintes:

- Considera-se separadamente a falha da matriz e da fibra, á compressão e tração;
- No modo de falha da matriz considera-se que são os componentes do vetor de tensão no plano de falha que são os responsáveis pela mesma;
- Supõe-se que a interação dos distintos componentes que intervêm num modo de falha é quadrática.

Apesar das diferenças em ambos os critérios é considerado que a rotura/falha da matriz (FM) e a rotura/falha da fibra (FF) ocorrem de forma isolada.

Tabela 17 Critérios de Hashin para o caso bidimensional de tensões (tabela retirada de [34])

Modos de Falha	Hashin 1973	Hashin 1980
Falha da Fibra à Tração (FFT)	$\sigma_{11} = X_T$ $(\sigma_{11}, X_T > 0)$	$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (\sigma_{11} > 0)$
Falha da Fibra à Compressão (FFC)	$ \sigma_{11} = X_T$ $(\sigma_{11} < 0, X_C > 0)$	$ \sigma_{11} = X_T \quad (\sigma_{11} < 0, X_C > 0)$
Falha da Matriz à Tração (FMT)	$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$ $(\sigma_{22} > 0)$	$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (\sigma_{22} > 0)$
Falha da Matriz à Compressão (FMC)	$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$ $(\sigma_{22} < 0)$	$\left(\frac{\sigma_{22}}{2 \cdot S_T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2 \cdot S_T}\right)^2 - 1\right] \cdot \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$ $(\sigma_{22} < 0)$

Para um estado biaxial de tensão, a única diferença entre os dois critérios prende-se com a inclusão no critério de 1980 da contribuição de S_{12} para a falha a tração. Esta alteração no critério inicial vai ao encontro do segundo fundamento do critério, que supõe que todos os componentes do vetor de tensão no plano de falha contribuem para o mesmo. Contudo refere-se que esta modificação não tem um suporte em fundamentos físicos claros, e em todo o caso o segundo fundamento não é considerado para a falha da matriz.

Sabendo-se que a interação entre os componentes que intervêm no modo de falha é quadrática Hashin tenta evitar qualquer ligação entre a sua proposta e conceitos energéticos.

Relativamente á falha da matriz verifica-se que os dois critérios são diferentes quando se estuda uma situação de compressão. Estas diferenças ficam a dever-se ao facto da proposta de 1980 surgir da particularização para o estado bidimensional de uma expressão tridimensional. Para a matriz Hashin propõe uma interação quadrática dos invariantes do estado de tensões, abandonando assim a sua ideia inicial de relacionar o critério de falha com o modo em que a falha ocorre. Nesta função verifica-se a presença de um valor admissível S_T , sendo este uma característica tridimensional dentro de uma relação bidimensional e a ausência da tensão associada á dita resistência, σ_{22} . Uma discussão sobre as implicações dos critérios de Hashin e o aparecimento de uma resistência fora do plano na rotura de uma lâmina antes da carga biaxial pode ser encontrada na obra de París [35].

Comparando os resultados experimentais com os resultados obtidos utilizando os 2 critérios de Hashin verifica-se que os resultados obtidos por esses mesmos critérios são muito aproximados aos encontrados nos ensaios práticos.

O critério de Hashin 3D, que é a principal proposta do trabalho de Hashin 1980, é também dividido em quatro modos de falha:

- Falha da Fibra á tração (FPT):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \frac{1}{S^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (eq. 36)$$

$$\sigma_{11} = X_T \quad (eq. 37)$$

Sendo, S a resistência mecânica ao corte no plano L-T, ou o valor admissível da tensão de corte σ_{12} e X_T é a resistência mecânica das camadas do compósito na direção das fibras á tração.

- Falha da Fibra à compressão (FPC):

$$|\sigma_{11}| = X_c \text{ (eq. 38)}$$

Aonde X_c é a resistência mecânica das camadas do compósito na direção das fibras, à compressão

- Falha da Matriz à tração (FMT) $(\sigma_{22} + \sigma_{33}) < 0$:

$$\frac{1}{Y_T^2} \cdot (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_T^2} \cdot (\sigma_{23}^2 - \sigma_{22} \cdot \sigma_{33}) + \frac{1}{S^2} \cdot (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (\text{eq. 39})$$

Sendo Y_T a resistência mecânica das camadas do compósito na direção transversal às fibras à tração e S_T a resistência mecânica ao corte interlaminar, ou valor admissível da tensão de corte σ_{23} .

- Falha da Matriz à compressão (FMT) $(\sigma_{22} + \sigma_{33}) < 0$:

$$\frac{1}{Y_c} \cdot \left[\left(\frac{Y_c}{2 \cdot S_T} \right)^2 - 1 \right] \cdot (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1}{4 \cdot S_T^2} \cdot (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_T^2} \cdot (\sigma_{23}^2 - \sigma_{22} \cdot \sigma_{33}) + \frac{1}{S^2} \cdot (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (\text{eq. 40})$$

Aonde Y_c é a resistência mecânica das camadas do compósito na direção transversal às fibras à compressão.

Define-se a carga crítica como sendo a carga que levaria ao início da rotura, isto é que a carga que levaria a que as equações de Hashin fossem igualadas. Sendo o critério quadrático é possível fazer a determinação da carga crítica, usando-se para tal a seguinte equação:

$$P_{\text{critico}} = \frac{P}{\sqrt{m}} \text{ (eq. 41)}$$

Sendo m o valor máximo da expressão do critério de Hashin.

III-Trabalhos Práticos

1. Conceção

Tendo por base os conceitos obtidos em outros projetos pretendeu-se reduzir o peso da carroçaria sem afetar a sua rigidez e desempenho estrutural. Para tal, pretende-se realizar a substituição da carroçaria tradicional em aço por uma estrutura realizada em uma sanduiche de materiais compósitos. Estudados os vários processos que possibilitavam a obtenção dessa mesma estrutura optamos pela realização combinada das técnicas de enrolamento filamentar a seco para obter uma pré-forma que depois é impregnada segundo um processo de SCRIMP. A utilização em conjunto destes processos produtivos permite ultrapassar as limitações individuais de cada um deles.

Em seguida serão apresentadas as principais razões que nos levaram a realizar esta opção:

- Permitem a obtenção de uma peça que terá características mecânicas infinitamente superiores às equivalentes realizadas por moldação manual;
- A realização do corpo central da carroçaria por enrolamento filamentar permite a obtenção de uma peça única de grande espessura, realizada com filamentos contínuos dispostos de uma forma exata e repetitiva de camada em camada que podem ser orientados consoante a direção preferencial do carregamento. A obtenção de um corpo central da carroçaria formada por uma peça única seria muito difícil de obter por qualquer outro processo produtivo;
- Mesmo necessitando de bastante material não recuperável, como por exemplo material de absorção, filmes desmoldantes, sacos de vácuo, etc... é mesmo assim um processo bastante mais barato que a realização de uma peça equivalente em autoclave, mesmo porque seria muito difícil de encontrar um autoclave que permitisse curar uma peça única com as dimensões pretendidas;
- Com a opção pela realização de um enrolamento filamentar a seco conseguimos obter todas as vantagens inerentes ao processo de enrolamento, conseguindo numa fase posterior selecionar quais as zonas da pré-forma que pretendemos impregnar. Conseguindo-se poupar uma quantidade considerável de fibra que pode ser reaproveitada para a fabricação de outros componentes para a estrutura. Ou seja, usando simultaneamente as duas técnicas é possível evitar o uso de insertos *in-situ*, sem afetar as características mecânicas das peças produzidas uma vez que o corte das fibras na região das janelas só será realizado após a consolidação da restante estrutura não se verificando o relaxamento da tensão de enrolamento com a consequente diminuição das características mecânicas. Se pretendesse-mos realizar o corte das fibras numa técnica de enrolamento convencional existiria uma forte relaxação das fibras e a consequente diminuição local das propriedades mecânicas da estrutura;
- A produção de moldes para a execução de uma carroçaria seria sempre uma tarefa complexa como tal não existe qualquer agravamento substancial da situação que inviabiliza-se a opção pelo enrolamento filamentar;
- Com a aplicação de vácuo consegui-mos que a resina penetre melhor as fibras obtendo peças com baixas percentagens de vazios e com altas percentagens de reforço;

1. Conceção

- Utilizando-se uma técnica de moldação por injeção conseguimos reduzir fortemente a quantidade de vapores de estireno libertados para o meio ambiente em comparação com a técnica de enrolamento filamental tradicional.

Como não existe nenhum processo que não apresente alguma limitação achamos que podíamos sacrificar um pouco a qualidade da superfície exterior do autocarro, uma vez que utilizando uma técnica de enrolamento a mesma será sempre sofrível, mas pode ser melhorada com a utilização de tecidos técnicos no processo de SCRIMP e operações de melhoria do acabamento superficial á *posteriori*.

Durante a execução do trabalho prático não serão abordadas questões relativas ao comportamento do chassi uma vez que não haverá nenhuma alteração ao conceito original do mesmo.

O conceito da carroçaria assenta sobre a plataforma de um autocarro da marca Volvo e do modelo B10M já existente no mercado que pode ser visto em circulação ao serviço, por exemplo, da STCP. Possui 8,60 metros de comprimento, 2,5 metros de largura, 2,610 metros de altura tendo uma distância entre eixos de 6,0 metros. A motorização fica a cargo de um motor *diesel* que tem uma potência aproximada de 360 cv.

O conceito do qual partimos é apresentado nas seguintes figuras:



Figura 31 Desenho virtual do FEUPBUS/CIVITAS



Figura 32 Vista Lateral do autocarro

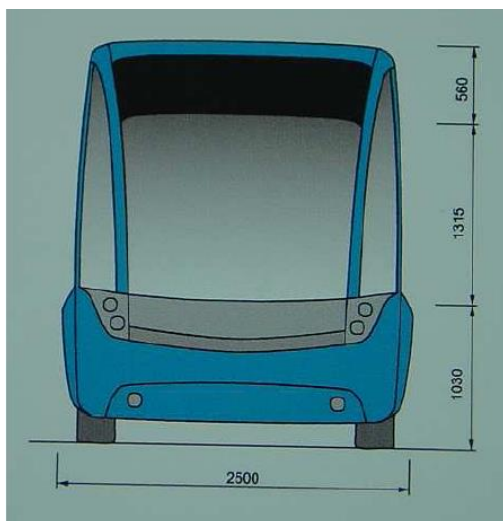


Figura 33 Vista da frente do autocarro

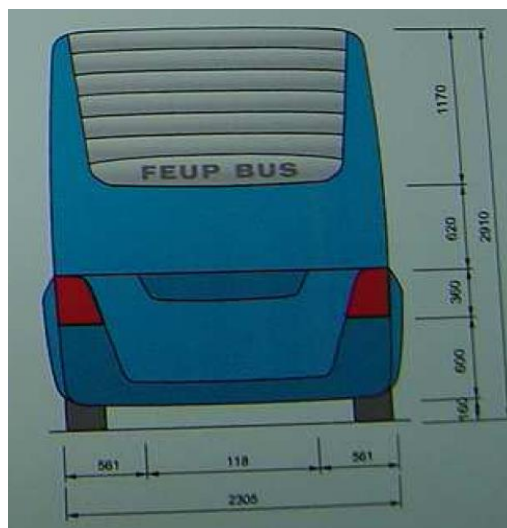


Figura 34 Vista da traseira do autocarro

Como o autocarro se destina a realizar viagens em que a distância percorrida é pequena e realizada dentro da malha urbana das cidades, deve ser dada particular atenção a facilidade de entrada e saída dos passageiros. Por conseguinte, a colocação de uma escada visa tornar mais fácil e rápida a entrada e saída de pessoas com limitações físicas.

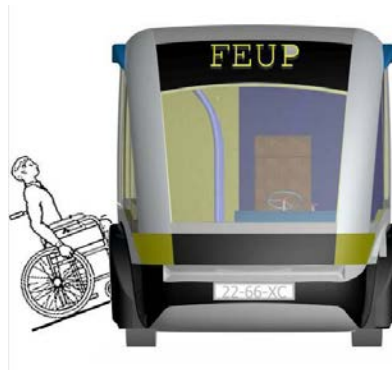


Figura 35 Autocarro com a respetiva plataforma para a entrada de pessoas de mobilidade reduzida

Tal como já foi referido em momentos anteriores, o autocarro destina-se a realizar viagens de curta duração, como tal, é perfeitamente aceitável sacrificar um pouco a comodidade do transporte dos passageiros em prol de um aumento da capacidade de transporte do autocarro.

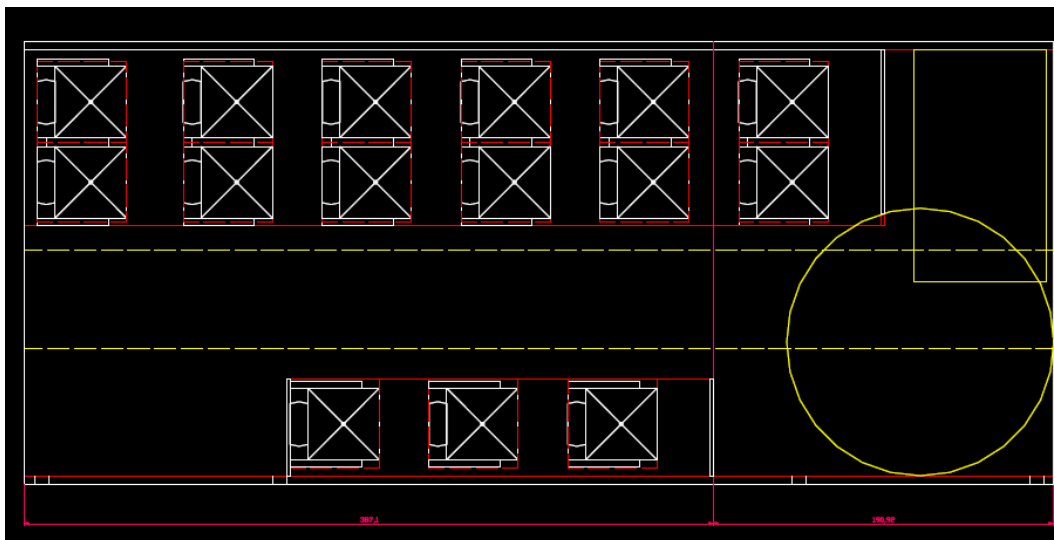


Figura 36 Vista de cima do autocarro com a respetiva disposição provável de lugares

2. Material Utilizado

2.1. Material do laminado

Para a construção da carroçaria optou-se por utilizar uma fibra de vidro do tipo E e uma resina isofetálica de poliéster não-saturado. A opção por este tipo de resina e fibra deveu-se meramente a razões do ponto de vista económico, aliado ao facto de ser possível encontrar facilmente no mercado este tipo de materiais. Sabendo-se de antemão que as propriedades destes materiais se coadunam perfeitamente com a função e os esforços a que vão estar sujeitos na carroçaria de um autocarro.

Utilizando o *software* ESACOMP® 4.4.1 foi possível obter as principais características mecânicas do laminado que apresentamos em seguida:

Tabela 18 Propriedades gerais do reforço a utilizar

Reforço	
Tipo de reforço	Unidirecional
Densidade (ρ)	1870 Kg/m ³
Espessura de cada camada	0.50 mm
Massa por Área	935 g/m ²

Propriedades mecânicas (ortotrópicas):

Tabela 19 Propriedades mecânicas

E_1	38 GPa	G_{12}	3.5 GPa	ν_{12}	0.3
E_2	8.5 GPa	G_{31}	3.5 GPa	ν_{31}	0.3
E_3	8.5 GPa	G_{23}	3.269 GPa	ν_{23}	0.3

Coefficientes de expansão térmicos e de humidade (ortotrópicas):

Tabela 20 Coeficientes de expansão térmicos e de humidade

α_1	6 e-6/°C	β_1	0 e-2/w%
α_2	27.5 e-6/°C	β_2	0.6 e-2/w%
α_3	27.5 e-6/°C	β_3	0.6 e-2/w%

Valores nominais para as primeiras tensões e deformações de falha (ortotrópicas):

Tabela 21 Valores nominais para as primeiras tensões e deformações de falha

$X_t / X_{eps,t}$	700MPa/1.84%	$X_c / X_{eps,C}$	500 MPa/ 1.32%	S / S_{eps}	40MPa/1.14 %	(12)
$Y_t / Y_{eps,t}$	30MPa/0.353%	$Y_c / Y_{eps,C}$	100 MPa/ 1.18%	R / R_{eps}	40MPa /1.14%	(31)
$Z_t / Z_{eps,t}$	30MPa/0.353%	$Z_c / Z_{eps,C}$	100 MPa/ 1.18%	Q / Q_{eps}	26.15 MPa / 0.8 %	(23)

Valores nominais finais para as tensões e deformações de falha (ortotrópicas):

2.Material Utilizado

Tabela 22 Valores nominais finais para as tensões e deformações de falha

$X_t / X_{eps,t}$	700 MPa / 1.9 %	$X_t / X_{eps,C}$	500 MPa / 1.35 %	S / S_{eps}	40 MPa / 2 %	(12)
$Y_t / Y_{eps,t}$	- MPa / - %	$Y_t / Y_{eps,C}$	100 MPa / 1.2 %	R / R_{eps}	40 MPa / 2 %	(31)
$Z_t / Z_{eps,t}$	- MPa / - %	$Z_t / Z_{eps,C}$	100 MPa / 1.2 %	Q / Q_{eps}	- MPa / - %	(23)

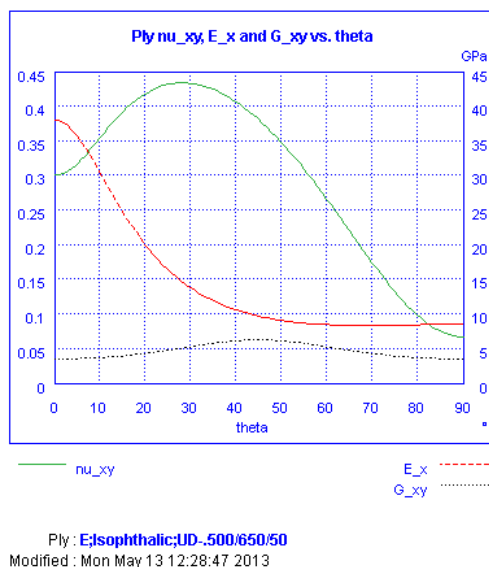


Figura 37 Variação das principais propriedades mecânicas em função do ângulo Θ , figura retirada do software ESACOMP®
4.4.1

2.2. Material do núcleo da sanduiche

Para a construção dos painéis da carroçaria a opção passou pela utilização de uma espuma de PVC da marca Changzhou Tiansheng Composite Materials Co., Ltd. denominada de Strucell P80. Opta-mos por esta solução porque é mais barata do ponto de vista económico que uma solução em ninho de abelha e a sua utilização simplifica grandemente o processo de SCRIMP.

Seguidamente serão apresentadas as principais características mecânicas desta espuma.

Tabela 23 Densidade da espuma a utilizar

Densidade (ρ)	80 kg/m ³
----------------------	----------------------

Propriedades mecânicas (isotrópicas):

Tabela 24 Propriedades mecânicas da espuma Strucell P80

E	0.0783 GPa
G	0.027 GPa
ν	0.45

Valores nominais para as primeiras tensões e deformações de falha (ortotrópicas):

Tabela 25 Valores nominais para as primeiras tensões e deformações de falha para o Strucell P80

$X_t / X_{eps,t}$	2.5 MPa / 3.19 %	$X_c / X_{eps,C}$	1.4 MPa / 1.79 %	S / S_{eps}	1.15 MPa / 4.25926 %
-------------------	------------------	-------------------	------------------	---------------	----------------------

Valores mínimos para as tensões e deformações de falha (isotrópicas):

Tabela 26 Valores mínimos para as tensões e deformações de falha para o Strucell P80

$X_t / X_{eps,t}$	2.2 MPa / 2.81 %	$X_c / X_{eps,C}$	1.15 MPa / 1.47 %	S / S_{eps}	0.95 MPa / 3.52 %
-------------------	------------------	-------------------	-------------------	---------------	-------------------

Durante o processo de estudo e escolha dos materiais a utilizar também estudamos a hipótese de utilizar painéis de ninho de abelha realizados em fibra aramídica com resina fenólica da marca HEXCEL de referência HRH-10-1/4-4.

Utilizando o *software* ESACOMP® 4.4.1 foi possível obter as principais características mecânicas do laminado que apresentamos em seguida:

Tabela 27 Densidade do ninho de abelha de referência HRH-10-1/4-4

Densidade (ρ)	64.0739kg/m ³
----------------------	--------------------------

Propriedades mecânicas (ortotrópicas):

Tabela 28 Propriedades mecânicas do ninho de abelha de referência HRH-10-1/4-4

E_1	1e-009	G_{12}	1e-009	ν_{12}	0.5
E_2	1e-009	G_{31}	0.0551581 GPa	ν_{31}	0
E_3	0.193053GPa	G_{23}	0.0241316 GPa	ν_{23}	0

Valores nominais para as primeiras tensões e deformações de falha (ortotrópicas):

Tabela 29 Valores nominais para as primeiras tensões e deformações de falha do ninho de abelha de referência HRH-10-1/4-4

$X_t / X_{eps,t}$	- MPa / - %	$X_c / X_{eps,C}$	- MPa / - %	S / S_{eps}	- MPa / - %	(12)
$Y_t / Y_{eps,t}$	- MPa / - %	$Y_c / Y_{eps,C}$	- MPa / - %	R / R_{eps}	1.72369 MPa / 3.12 %	(31)
$Z_t / Z_{eps,t}$	- MPa / - %	$Z_c / Z_{eps,C}$	3.30948MPa/1.71%	Q / Q_{eps}	0.861845MPa/3.57 %	(23)

Valores mínimos para as tensões e deformações de falha (ortotrópicas):

Tabela 30 Valores mínimos para as tensões e deformações de falha do ninho de abelha de referência HRH-10-1/4-

4

$X_t / X_{eps,t}$	- MPa / - %	$X_c / X_{eps,C}$	- MPa / - %	S / S_{eps}	- MPa / - %	(12)
$Y_t / Y_{eps,t}$	- MPa / - %	$Y_c / Y_{eps,C}$	- MPa / - %	R / R_{eps}	1.41 MPa / 2.56 %	(31)
$Z_t / Z_{eps,t}$	- MPa / - %	$Z_c / Z_{eps,C}$	= 2.68896 MPa / 1.39 %	Q / Q_{eps}	0.689MPa / 2.86 %	(23)

2.Material Utilizado

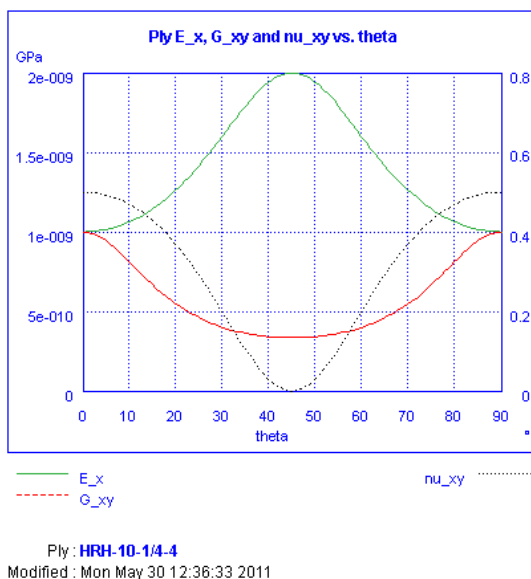


Figura 38 Variação das principais propriedades mecânicas em função do ângulo θ para o ninho de abelha HRH-10-1/4-4 , figura retirada do software ESACOMP® 4.4.1

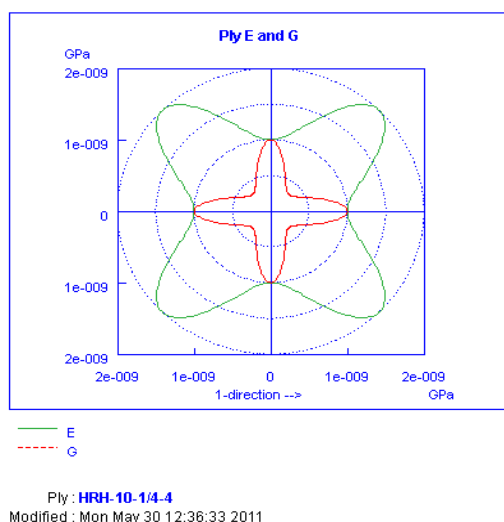


Figura 39 Representação gráfica na forma polar da variação dos valores do módulo de elasticidade longitudinal e transversal em função da direção para o HRH-10-1/4-4 , figura retirada do software ESACOMP® 4.4.1

3. Empilhamento de Camadas Utilizado

Terminado o processo de escolha dos materiais para a construção da carroçaria do autocarro procedeu-se à análise e seleção do lay-up ou empilhamento. A disposição das camadas e dos diferentes materiais usados visa dar ao veículo a maior rigidez possível para o menor peso, mas sem nunca comprometer a aprovação no ensaio de capotamento tal como veremos mais adiante. Decidimos, conceber a carroçaria recorrendo a dois diferentes tipos de secção compostos por diferentes lay-up dos mesmos materiais. Na próxima figura pretende-se representar a localização de cada secção.

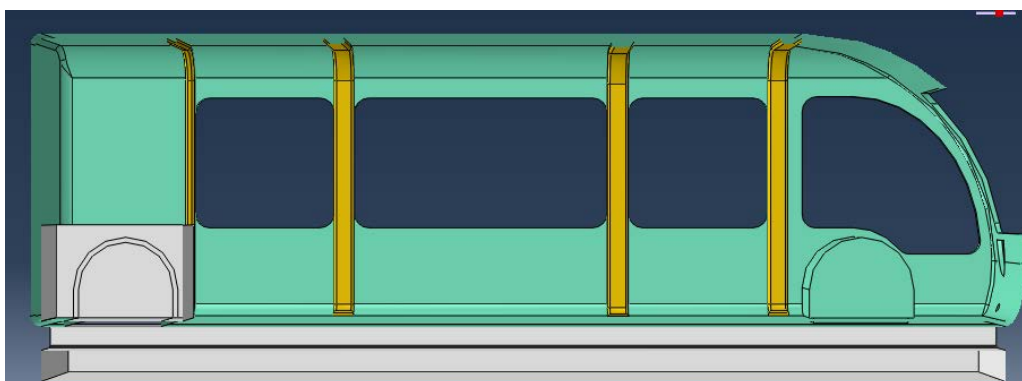


Figura 40 Vista de Corte do autocarro com a representação da localização das diferentes secções utilizadas

Nesta figura a cinzento encontram-se representadas as secções em aço que pretendem representar o chassis, o motor, as longarinas do autocarro. A verde está representado o corpo do autocarro e a amarelos os pilares do mesmo.

Tecnicamente o enrolamento que propomos assemelha-se ao enrolamento de uma tubagem de grandes dimensões, assim sendo, preocupando-nos apenas com os fenómenos diferenciadores entre o enrolamento de um tubo e o enrolamento de uma estrutura similar com forma de um perfil quadrangular. Otimizamos a solução proposta como uma sequência em que é feito um primeiro enrolamento de múltiplas camadas de fibra sobre o qual é depositado o núcleo da sanduiche sendo posteriormente realizada uma segunda sequência de enrolamento, dando origem a um laminado simétrico com as características mecânicas que pretendemos. Para a secção dos pilares aceitamos realizar, para além do enrolamento helicoidal estamos a utilizar para o corpo do autocarro, um enrolamento circunferencial.

Tentando obter a maior rigidez possível, com o mais baixo consumo e desperdício de fibra, após várias simulações, chegamos a um valor ótimo do ângulo de enrolamento de 20° medidos em relação ao plano perpendicular ao eixo do mandril. Utilizamos este ângulo, pois verificamos que para ângulos superiores a este o custo e o peso das soluções propostas aumentava. Simultaneamente utilizando este ângulo conseguimos evitar o fenómeno de escorregamento das fibras que seria muito prejudicial para a cadência e custo do processo produtivo.

Seguidamente, nas próximas figuras, é exposta uma representação do empilhamento de cada secção e alguns gráficos retirados ESACOMP® 4.4.1 da variação das suas características mecânicas em função do ângulo de enrolamento.

3. Empilhamento de Camadas Utilizado

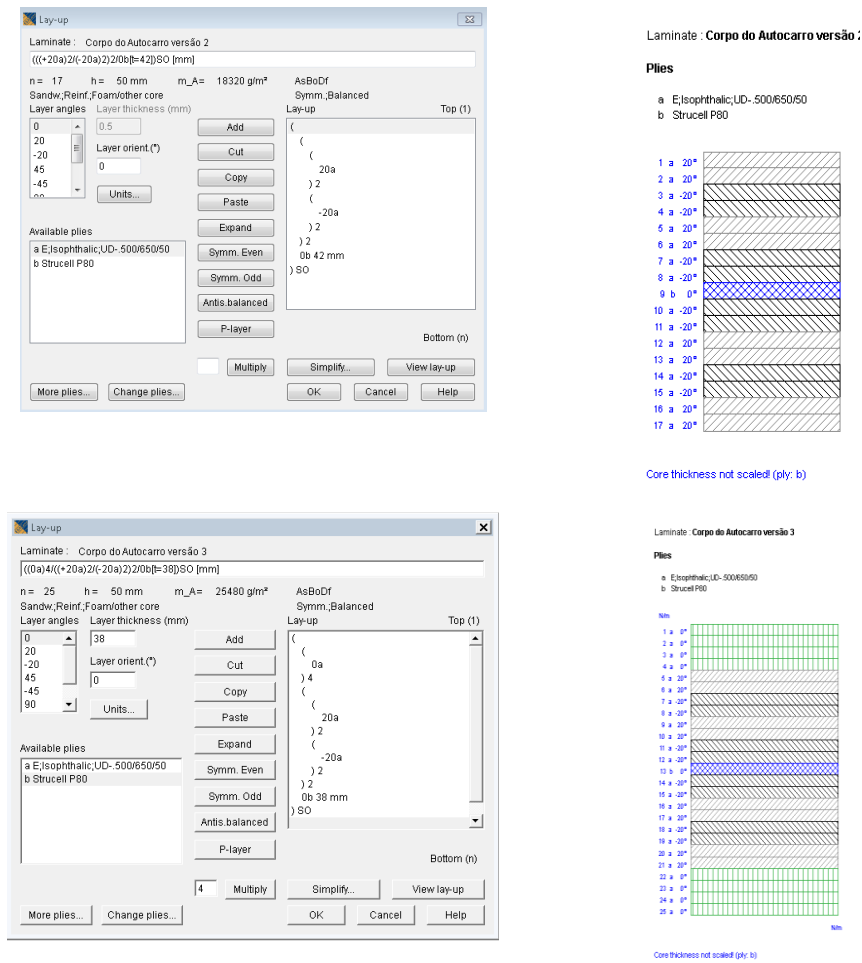
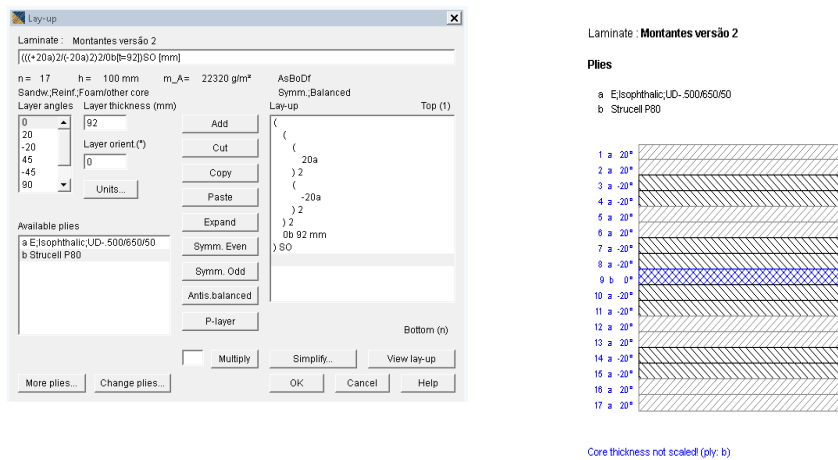


Figura 41 Representação esquemática das sequências de empilhamento estudadas para o enrolamento do corpo do FEUP BUS, figura retirada do software ESACOMP® 4.4.1



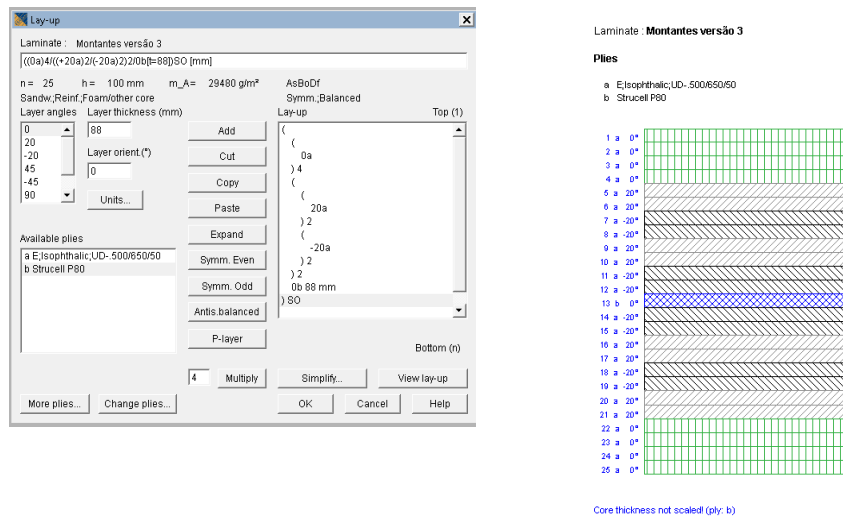


Figura 42 Representação esquemática das sequências de empilhamento estudadas para o enrolamento dos pilares do FEUP BUS, figura retirada do software ESACOMP® 4.4.1

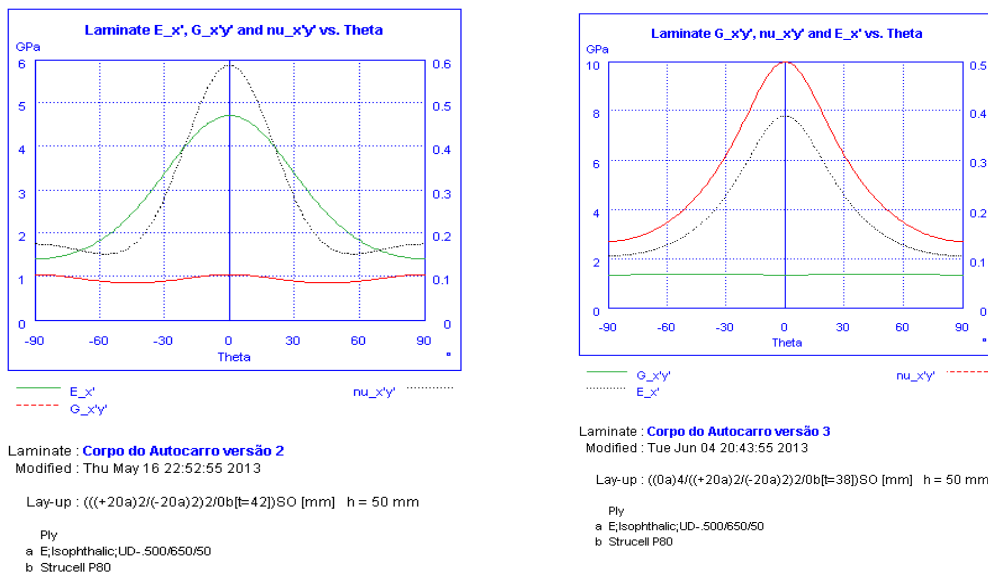


Figura 43 Variação das principais propriedades mecânicas em função do ângulo Θ para os laminados que constituem o corpo da carroçaria do autocarro retirado do ESACOMP® 4.4.1

3. Empilhamento de Camadas Utilizado

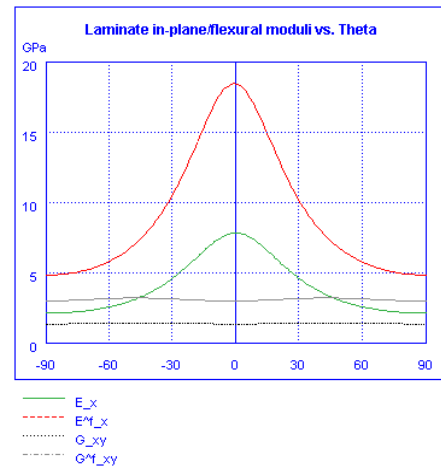
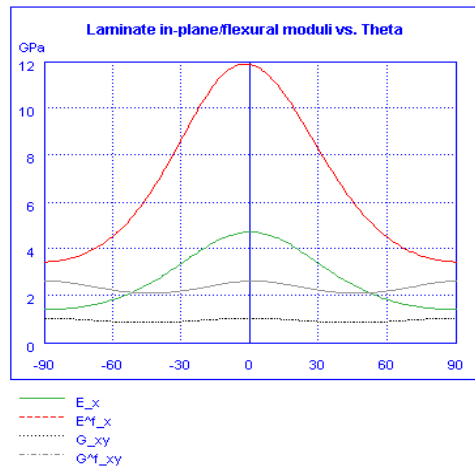


Figura 44 Representação gráfica dos valores dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal á flexão no plano do laminado em função da sua orientação para as secções que constituem o corpo da carroçaria do autocarro retirado do ESACOMP® 4.4.1

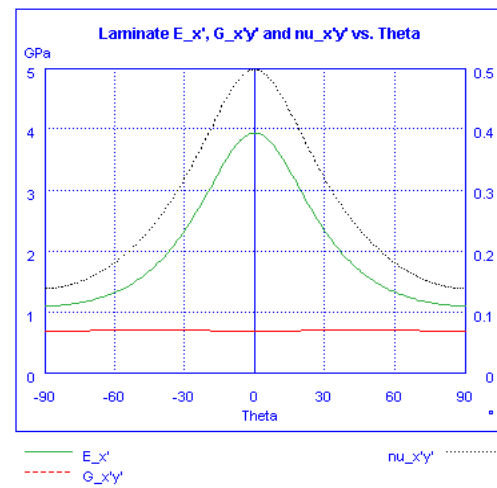
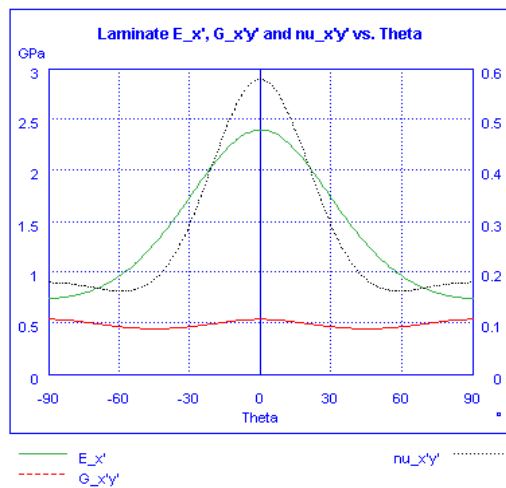


Figura 45 Variação das principais propriedades mecânicas em função do ângulo Θ para os laminados que constituem os pilares da carroçaria do autocarro retirado do ESACOMP® 4.4.1

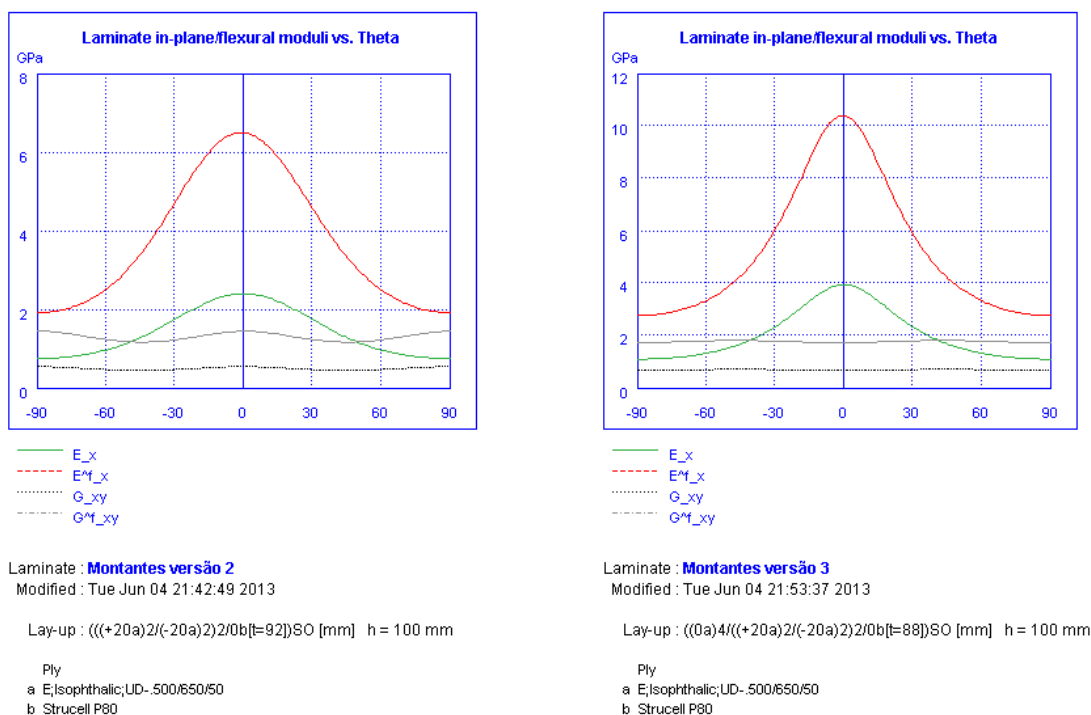


Figura 46 Representação gráfica dos valores dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal á flexão no plano do laminado em função da sua orientação para as secções que constituem a carroçaria do autocarro retirado do ESACOMP® 4.4.1

Utilizando todas as potencialidades do *software* ESACOMP® 4.4.1, para o critério de Hashin 3D foi possível obter os valores de carga críticos á tração e á compressão que levarão á rotura dos laminados, valores esses que se encontram representados nas próximas tabelas.

Tração

Tabela 31 Valores de carga críticos á tração para o laminado que constitui a versão 2 para o corpo do autocarro

Nome do Laminado: Corpo do Autocarro Versão 2		Carga Crítica[N/m]	Modo de Rotura	Camada Crítica
Forças	N_{xt}	2373247.00 N/m	Falha da fibra	a(20°), a(-20°)
	N_{yt}	275805.87	Falha da matriz	a(20°), a(-20°)
	N_{xy+}	561834.86	Falha da Matriz	a(-20°)
	Q_x	52893.02 N/m	Cisalhamento do núcleo	b(0°)
Momentos	M_{x+}	37031.77 Nm/m	Enrugamento da face superior do laminado	-
	M_{y+}	5628.02 Nm/m	Falha da matriz	17 a (20°)
	M_{xy+}	11569.10 Nm/m	Falha da Matriz	1 a (20°)

3. Empilhamento de Camadas Utilizado

Tabela 32 Valores de carga críticos á tração para o laminado que constitui a versão 3 para o corpo do autocarro

Nome do Laminado: Corpo do Autocarro Versão 3		Carga Crítica [N/m]	Modo de Rotura	Camada Crítica
Forças	N_{xt}	4085286.34 N/m	Falha da fibra	a(20°), a(-20°)
	N_{yt}	378700.48 N/m	Falha da matriz	a(0°)
	N_{xy+}	710561.34 N/m	Falha da Matriz	a(-20°)
	Q_x	51213.49 N/m	Cisalhamento do núcleo	b(0°)
Momentos	M_{x+}	55719.19 Nm/m	Enrugamento da face superior do laminado	-
	M_{y+}	7193.70 Nm/m	Falha da matriz	25a(0°)
	M_{xy+}	14122.27 Nm/m	Falha da Matriz	1a(20°)

Tabela 33 Valores de carga críticos á tração para o laminado que constitui a versão 2 para os pilares do autocarro

Nome do Laminado: Pilares Versão 2		Carga Crítica[N/m]	Modo de Rotura	Camada Crítica
Forças	N_{xt}	2422651.11 N/m	Falha da fibra	a(20°), a(-20°)
	N_{yt}	2422651.11 N/m	Falha da matriz	a(20°), a(-20°)
	N_{xy+}	576290.21 N/m	Falha da Matriz	a(-20°)
	Q_x	109917.57 N/m	Cisalhamento do núcleo	b(0°)
Momentos	M_{x+}	77549.42 Nm/m	Enrugamento da face superior do laminado	-
	M_{y+}	12495.72 Nm/m	Falha da matriz	17 a (20°)
	M_{xy+}	25553.03 Nm/m	Falha da Matriz	1 a (20°)

Tabela 34 Valores de carga críticos á tração para o laminado que constitui versão 3 para os pilares do autocarro

Nome do Laminado: Pilares Versão 3		Carga Crítica[N/m]	Modo de Rotura	Camada Crítica
Forças	N_{xt}	4130497.72 N/m	Falha da fibra	a(20°), a(-20°)
	N_{yt}	395001.77 N/m	Falha da matriz	a(0°)
	N_{xy+}	725012.60 N/m	Falha da Matriz	a(-20°)
	Q_x	108289.96 N/m	Cisalhamento do núcleo	b(0°)
Momentos	M_{x+}	118391.39 Nm/m	Enrugamento da face superior do laminado	-
	M_{y+}	16575.18 Nm/m	Falha da matriz	25a(0°)
	M_{xy+}	31933.70 Nm/m	Falha da Matriz	5a(20°)

Compressão

Tabela 35 Valores de carga críticos á compressão para o laminado que constitui o corpo do autocarro versão 2

Nome do Laminado: Corpo do Autocarro Versão 2		Carga Crítica[N/m]	Modo de Rotura	Camada Crítica
Forças	N_{xc}	-1621703.00 N/m	Enrugamento das faces superiores e inferiores do laminado	-
	N_{yc}	-816284.74 N/m	Falha da matriz	a(20°), a(-20°)
	N_{xy-}	-561834.86 N/m	Falha da Matriz	a(-20°)
	Q_y	52504.06 N/m	Cisalhamento do núcleo	b(0°)
Momentos	M_{x-}	-37031.77 Nm/m	Enrugamento da face inferior do laminado	-
	M_{y-}	-5628.02 Nm/m	Falha da matriz	1 a (20°)
	M_{xy-}	-11569.10 Nm/m	Falha da Matriz	17 a (20°)

Tabela 36 Valores de carga críticos á compressão para o laminado que constitui o corpo do autocarro versão 3

Nome do Laminado: Corpo do Autocarro Versão 3		Carga Crítica[N/m]	Modo de Rotura	Camada Crítica
Forças	N_{xc}	-2512988.19 N/m	Enrugamento da face superior e inferior do laminado	-
	N_{yc}	-1215387.38 N/m	Falha da matriz	a(20°), a(-20°)
	N_{xy-}	-710561.34 N/m	Falha da Matriz	a(20°)
	Q_y	50550.52 N/m	Cisalhamento do núcleo	b(0°)
Momentos	M_{x-}	-55719.19 Nm/m	Enrugamento da face superior do laminado	-
	M_{y-}	-7193.70 Nm/m	Falha da matriz	1a(0°)
	M_{xy-}	-14122.27 Nm/m	Falha da Matriz	25a(20°)

Tabela 37 Valores de carga críticos á compressão para o laminado que constitui os pilares versão 2

Nome do Laminado: Motantes Versão 2		Carga Crítica [N/m]	Modo de Rotura	Camada Crítica
Forças	N_{xc}	-1646692.44 N/m	Enrugamento das faces superiores e inferiores do laminado	-
	N_{yc}	-866367.60 N/m	Falha da matriz	a(20°), a(-20°)
	N_{xy-}	-576290.21 N/m	Falha da Matriz	a(-20°)
	Q_y	108205.72 N/m	Cisalhamento do núcleo	b(0°)
M o ξ	M_{x-}	-77549.42 Nm/m	Enrugamento da face inferior do laminado	-

3. Empilhamento de Camadas Utilizado

M_{y-}	-12495.72 Nm/m	Falha da matriz	1 a (20°)
M_{xy-}	-25553.03 Nm/m	Falha da Matriz	17 a (20°)

Tabela 38 Valores de carga críticos á compressão para o laminado que constitui os pilares versão 3

Nome do Laminado: Pilares Versão 3		Carga Crítica[N/m]	Modo de Rotura	Camada Crítica
Forças	N_{xc}	-2537588.20 N/m	Enrugamento da face superior e inferior do laminado	-
	N_{yc}	-1266738.65 N/m	Falha da matriz	a(20°), a(-20°)
	N_{xy-}	-725012.60 N/m	Falha da Matriz	a(20°)
	Q_y	106736.79 N/m	Cisalhamento do núcleo	b(0°)
Momentos	M_{x-}	-118391.39 Nm/m	Enrugamento da face superior do laminado	-
	M_{y-}	-16575.18 Nm/m	Falha da matriz	1a(0°)
	M_{xy-}	-31933.70 Nm/m	Falha da Matriz	25a(20°)

4. Simulações

Neste capítulo abordaremos a questão das simulações. As simulações efetuadas pretendem estudar a resposta da estrutura em materiais compósitos quando sujeita às solicitações impostas pelos regulamentos ou por outras situações que podem ocorrer durante o ciclo de vida do veículo, como por exemplo, colisões frontais e laterais. Com estes ensaios pretendemos provar que a solução apresentada em materiais compósitos, apesar de mais leve, consegue corresponder às solicitações do dia-a-dia com um nível de desempenho igual ou superior ao verificado para as soluções em materiais metálicos, provando assim a sua utilidade para construção de uma nova geração de autocarros mais leves, limpos e eficientes.

Antes de prosseguirmos com a descrição dos ensaios e dos seus respetivos resultados devemos referir que por uma questão de falta de recursos computacionais adequados às exigências, optamos por submeter a ensaios apenas a secção central de autocarro, deixando de fora do processo de simulação a secção frontal e traseira do veículo. Apesar desta limitação os resultados obtidos são bastantes satisfatórios mas carecem de comprovação com ensaios práticos. A estrutura foi modelada no *software* de elementos finitos como sendo uma casca. Poder-se-ia ter optado por modelar a estrutura como sendo um corpo sólido, no entanto essa opção tornaria o processo de simulação mais lento e não acrescentaria mais rigor aos resultados obtidos. Relativamente à malha utilizada na simulação decidimos não recorrer aos tipos de malha predefinidos no *software* porque obteríamos uma malha com um grande grau de distorção, o que afetaria a qualidade dos resultados obtidos. Por essa razão, optamos por sermos nós mesmos a desenhar a malha sendo esta formada por elementos quadrangulares. Desta forma conseguimos obter uma estrutura com uma malha uniforme e com baixo grau de distorção.

Em todos os ensaios as deformações existentes na estrutura encontram-se expressas em milímetros. Para que seja possível ter uma ideia da propagação do dano na estrutura foi utilizado o critério de Hashin 1980 nativo do *software* utilizado.

Utilizando o critério de Hashin 1980, para a fibra e matriz utilizados foram estabelecidos os seguintes valores para o início da propagação do dano:

- Tensão de cedência à tração na direção longitudinal: 500 MPa
- Tensão de cedência à compressão na direção longitudinal: 700 MPa
- Tensão de cedência à tração na direção transversal: 30 MPa
- Tensão de cedência à compressão na direção transversal: 100 MPa
- Tensão de corte limite para a propagação do dano: 40 MPa

Estes valores correspondem às tensões de cedência e de corte à tração e à compressão do sistema fibra-resina utilizado.

4.1. Valores de referência

Previamente a prosseguirmos a descrição do nosso trabalho, era importante realizar uma pequena paragem para a bordar quais os valores típicos que as estruturas tradicionais realizadas em materiais de origem

metálica costumam apresentar. Devido ao carácter altamente concorrencial do mercado foi difícil realizar a recolha de valores típicos, não existindo também a certeza que estes sejam 100% corretos.

Para estabelecermos a comparação entre os resultados obtidos pela estrutura em materiais compósitos e uma estrutura tradicional utilizamos a estrutura do modelo Tourino da Caetano Bus, estando os resultados relativos a essa estrutura contidos no trabalho "Long life public service vehicle project study"[36]. A carroçaria deste modelo não passaria no ensaio de capotamento. Apresenta uma massa aproximada de 2281 Kg tendo uma rigidez torsional de $7.7E6 \text{ N}\cdot\text{m}^2$. Pelo que foi possível perceber a rigidez torsional foi determinada como sendo o quociente entre o momento axial aplicado e o ângulo de rotação em radianos por unidade de comprimento. Estes valores referem-se à estrutura completa. Quando apenas é estudada uma secção da carroçaria foram tidos em consideração para análise os perfis que constituem a carroçaria (deixando por isso de fora os painéis) a massa da estrutura desce para 356,7Kg e a rigidez torsional para $3,34E6 \text{ N}\cdot\text{m}^2$. Quando a esta secção da estrutura se adicionam os painéis laterais, os valores voltam a subir para 433,5Kg e $4,55E6 \text{ N}\cdot\text{m}^2$. Não sendo possível ter acesso a informação mais detalhada estes valores servem para, pelo menos, ter uma ideia da ordem de grandeza dos valores obtidos.



Figura 47 Autocarro Mercedes-Benz Tourino

4.2. Ensaio de Capotamento

Embora este autocarro se destine maioritariamente à realização de viagens em ciclo urbano, e como tal, para efeito de homologação não se encontrar obrigado a passar no ensaio de capotamento indicado pela diretiva 2001/85/CE [1] decidimos mesmo assim realizar esse mesmo ensaio. Para tal criamos um modelo para simulação estática usando o ABAQUS STANDARD. Neste ensaio garantimos que o autocarro sofre o capotamento para o lado das portas destinadas à saída e entrada de passageiros. Realizamos o capotamento para este lado pois pensamos que a secção apresenta uma menor resistência nesta lateral, configurando a situação mais gravosa.

Para a realização da análise estática de capotamento, tivemos de fazer algumas aproximações que agora referi-mos:

- Consideramos que na secção onde previsivelmente ocorrerá o impacto se encontra aplicada uma força uniformemente distribuída ao longo do comprimento da secção central, com uma intensidade que permita que a energia libertada durante o choque seja de 85 quilojoules. O valor de 85 quilojoules surge da impossibilidade da realização de ensaios dinâmicos. Para a obtenção deste valor baseámo-nos nos regulamentos [1] e [2] sendo uma aproximação que considera-mos razoável;

- Decompusemos a força aplicada segundo duas componentes uma vez que se pensa que durante o instante inicial da colisão do autocarro com o chão o ângulo existente é de 15° em relação ao plano horizontal;
- Consideramos que ao longo do comprimento do piso do autocarro existem duas zonas que se encontram encastradas. Com esta aproximação pretendemos representar a secção de ligação entre a carroçaria do autocarro e o seu chassi.

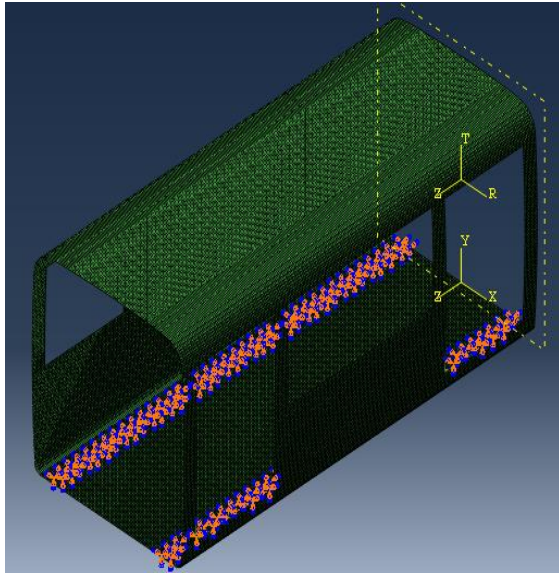


Figura 48 Representação dos apoios na secção central para o ensaio estático de capotamento

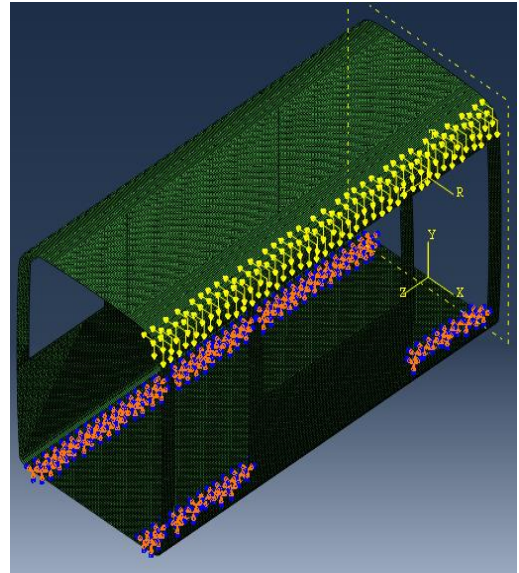


Figura 49 Representação cargas instaladas na secção central para o ensaio estático de capotamento

Para uma primeira tentativa consideramos que toda a estrutura era constituída por uma única secção com 50 milímetros de espessura com a sequência de empilhamento apresentada anteriormente com o nome Corpo do Autocarro versão 2. Nesta primeira análise não consideramos a inclusão de qualquer anel de reforço da carroçaria (pilares).

As figuras apresentadas em seguida representam a deformação e a propagação dos danos na matriz e nas fibras quer á compressão quer á tração.

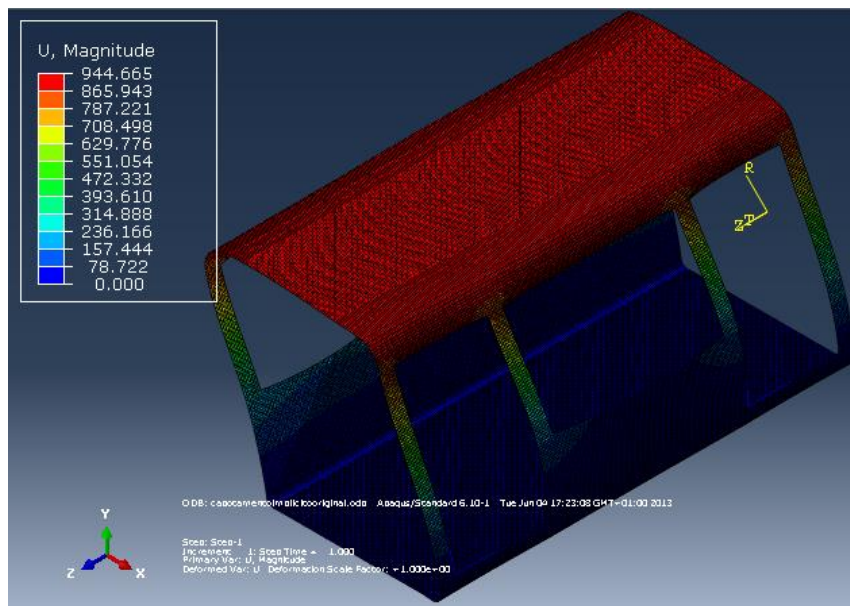


Figura 50 Representação gráfica das deformações ocorridas na estrutura para o ensaio estático de capotamento (fator de escala de 1x)

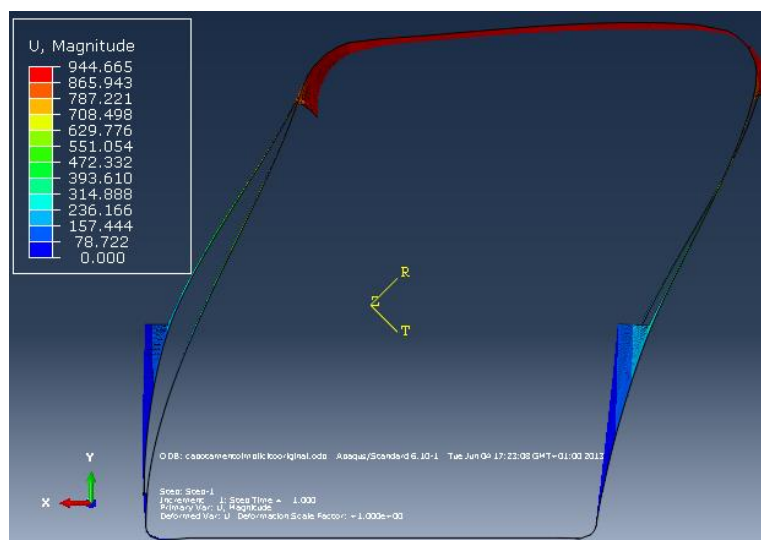


Figura 51 Vista de frente da deformação causada pelo ensaio de capotamento estático (fator de escala de 1X)

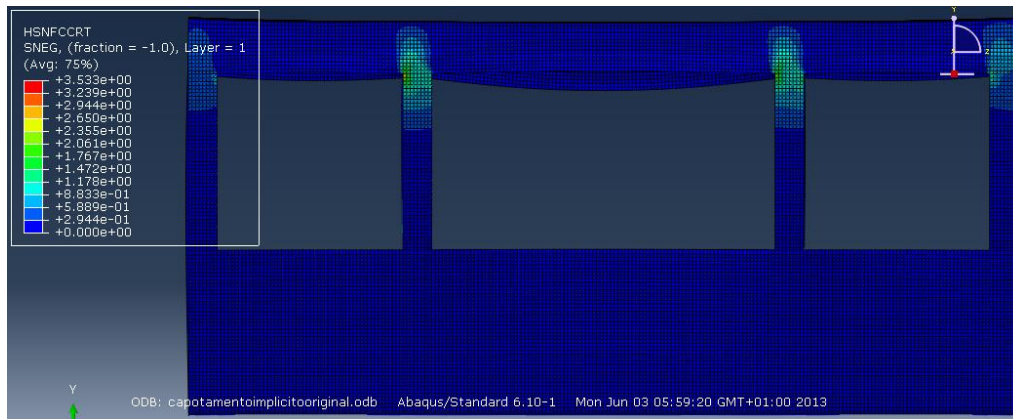


Figura 52 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central carroçaria

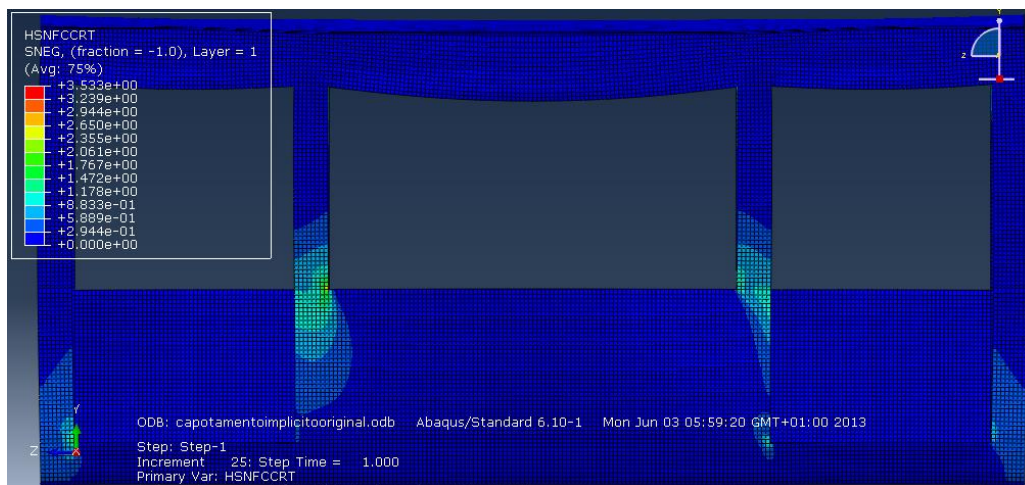


Figura 53 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central carroçaria

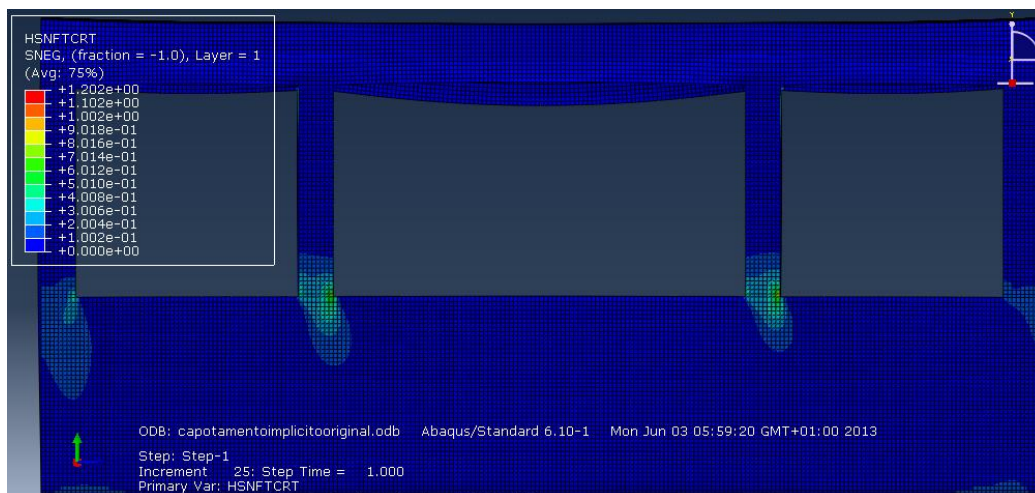


Figura 54 Vista da propagação do dano á tração das fibras da lateral esquerda da secção central carroçaria

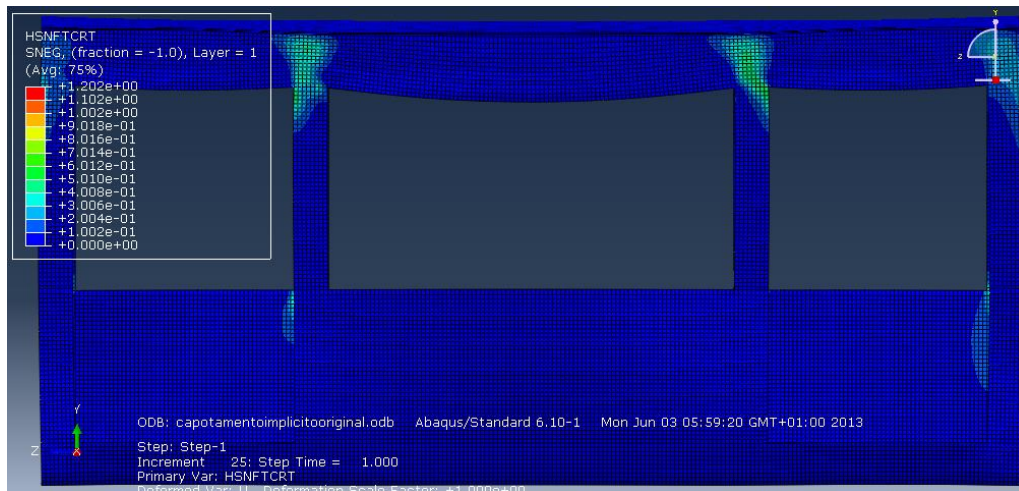


Figura 55 Vista da propagação do dano á tração das fibras da lateral direita da secção central carroçaria

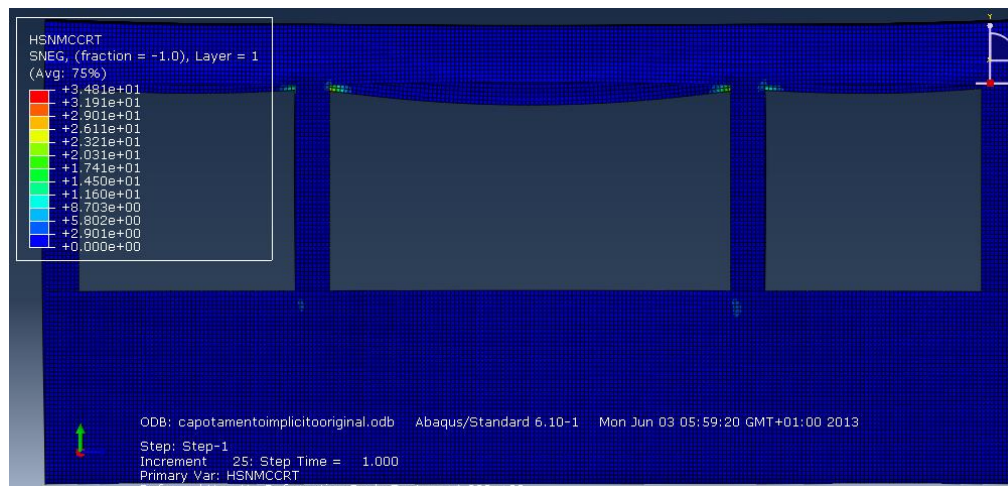


Figura 56 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria

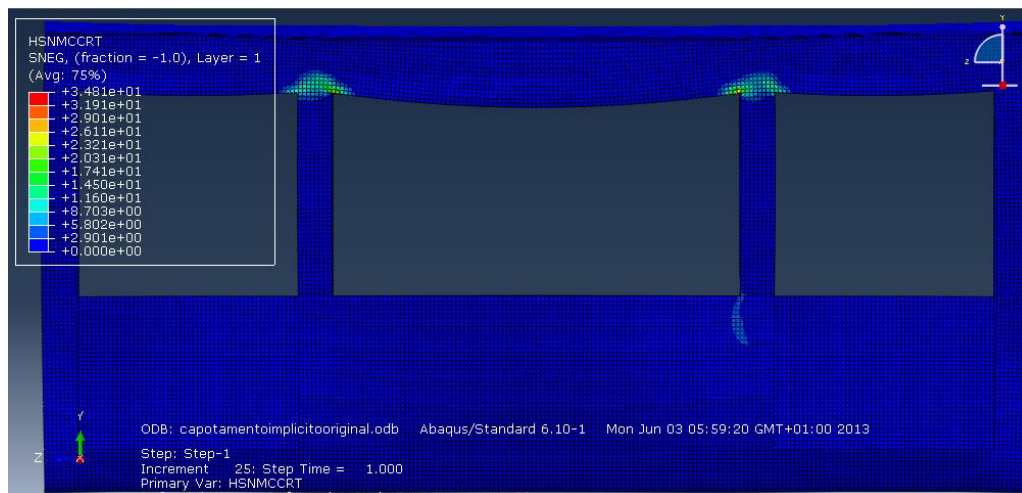


Figura 57 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central carroçaria

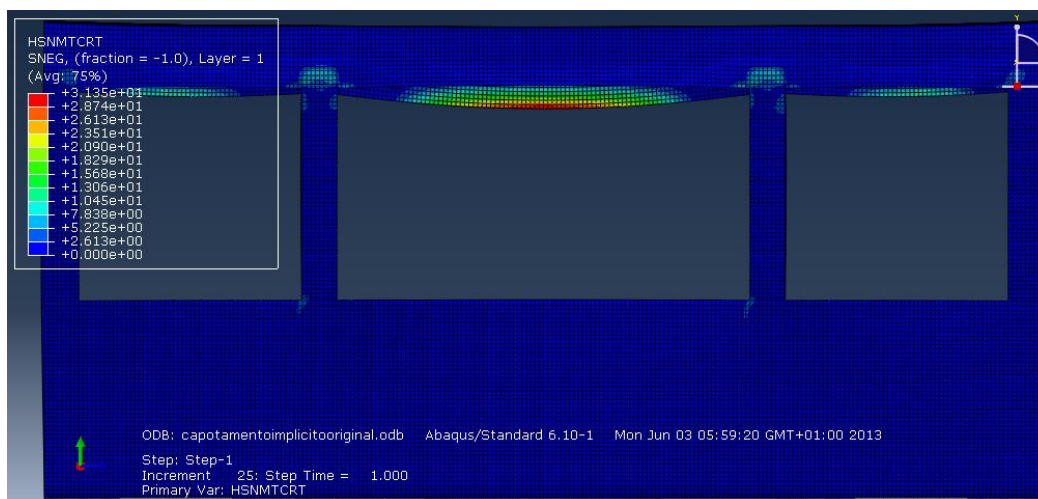


Figura 58 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria

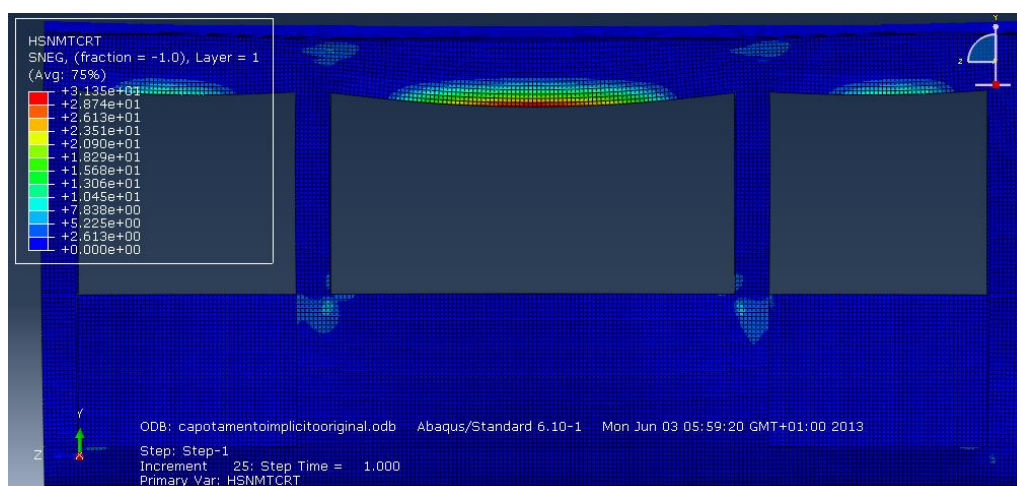


Figura 59 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central carroçaria

Pelo que pode ser verificado, a deformação existente na estrutura após o ensaio é elevada o que certamente colocará em risco a integridade física dos hipotéticos ocupantes da viatura.

Relativamente aos danos, de acordo com o critério de Hashin quando o valor representado na figura é superior á unidade verifica-se a propagação do dano na estrutura, podemos verificar que toda a estrutura ficará muito danificada existindo um colapso generalizado da mesma, quer á tração quer, e principalmente, á compressão. Em qualquer uma das situações o dano inicia-se, tal como previsível pela zona dos pilares. Mostrando claramente que estas zonas necessitam de um reforço de material de forma a aumentar a sua resistência ao impacto. Apenas o dano á compressão da matriz tem início numa região diferente que identificamos ser sensivelmente a meio vão da janela do lado direito, como tal pensamos que á priori será apenas necessário reforçar a zona dos pilares.

Partindo dos resultados obtidos na simulação anterior decidimos realizar um aumento localizado da espessura do núcleo da sanduiche mantendo-se inalterada a sequência de empilhamento das peles. As secções

sujeitas a este aumento da espessura do núcleo são as zonas dos pilares, nestas zonas a espessura do laminado será duplicada passando-se de 50 para 100 milímetros de espessura. Em seguida serão expostos os resultados obtidos.

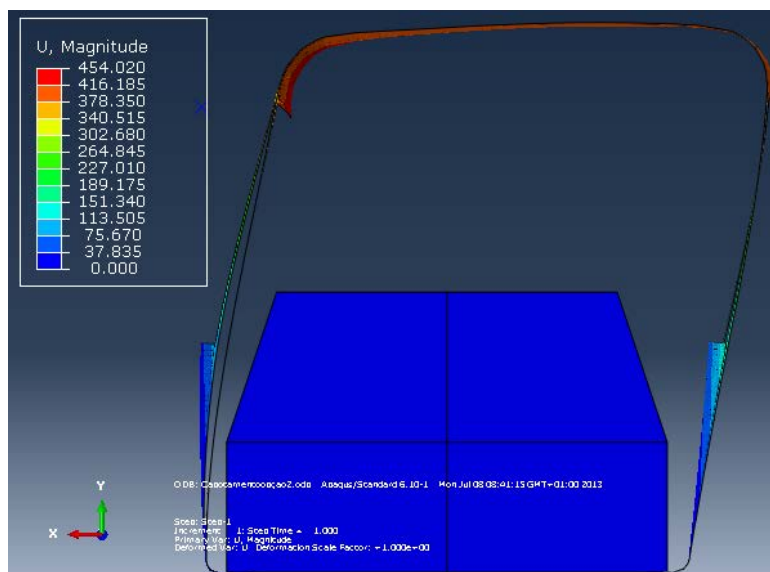


Figura 60 Vista de frente da deformação causada pelo ensaio de capotamento estático para a 2ª opção estudada (fator de escala de 1X)

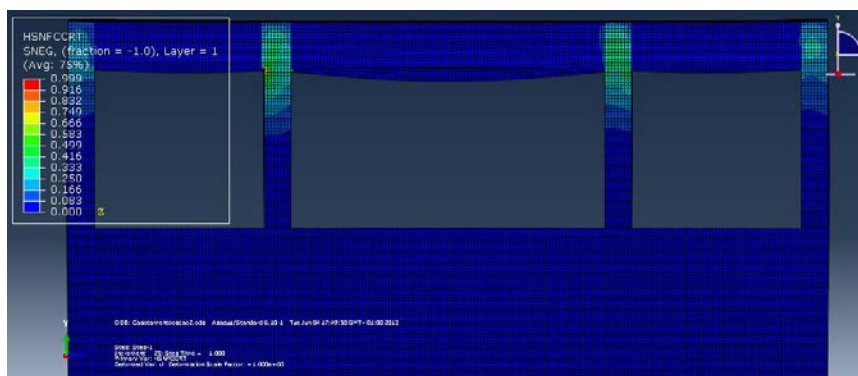


Figura 61 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central carroçaria para a segunda solução encontrada

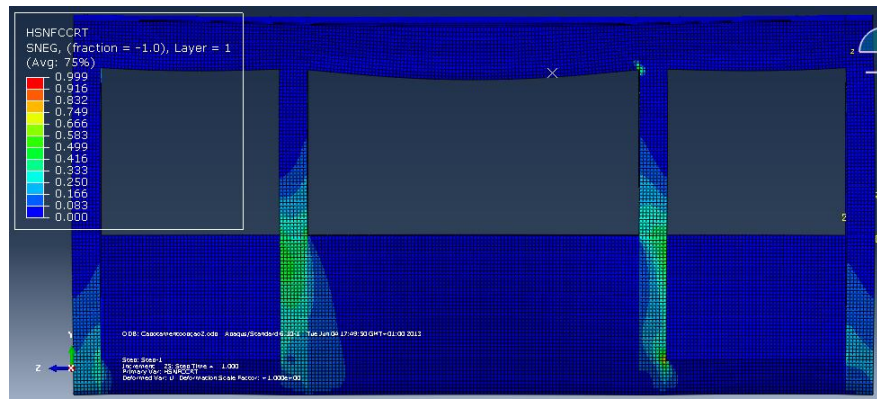


Figura 62 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central carroçaria para a segunda solução estudada

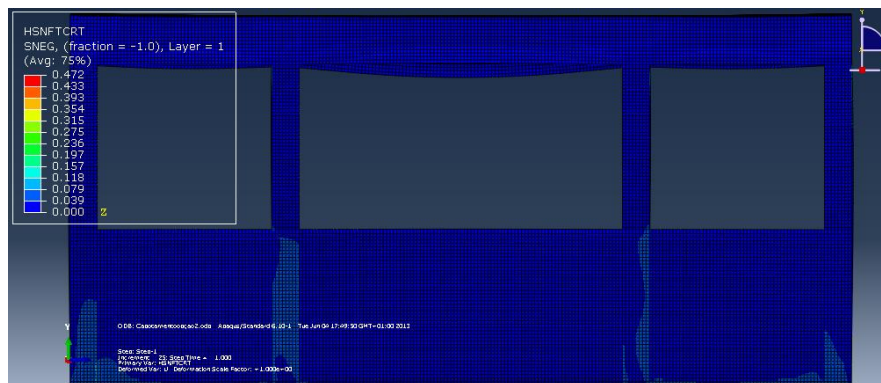


Figura 63 Vista da propagação do dano á tração das fibras da lateral esquerda da secção central carroçaria para a segunda solução encontrada

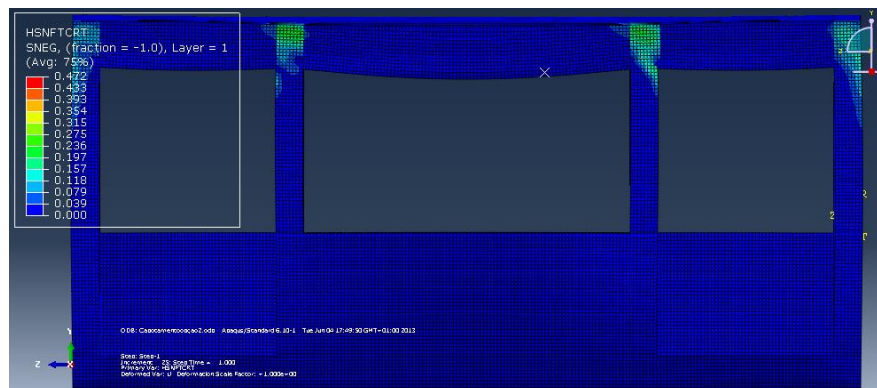


Figura 64 Vista da propagação do dano á tração das fibras da lateral direita da secção central carroçaria para a segunda opção estudada

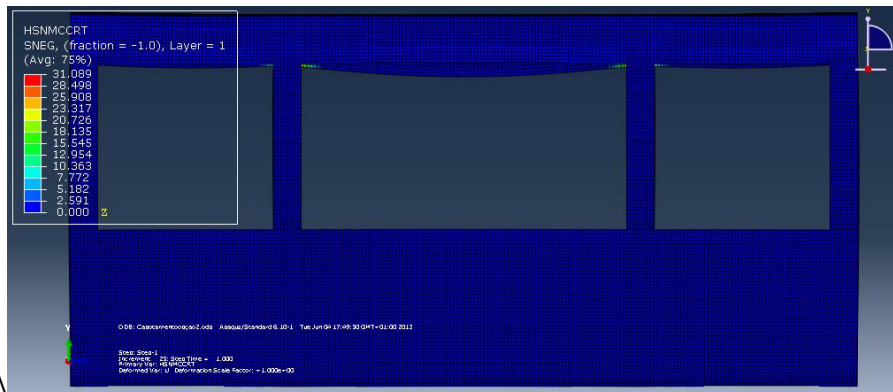


Figura 65 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria da segunda solução encontrada

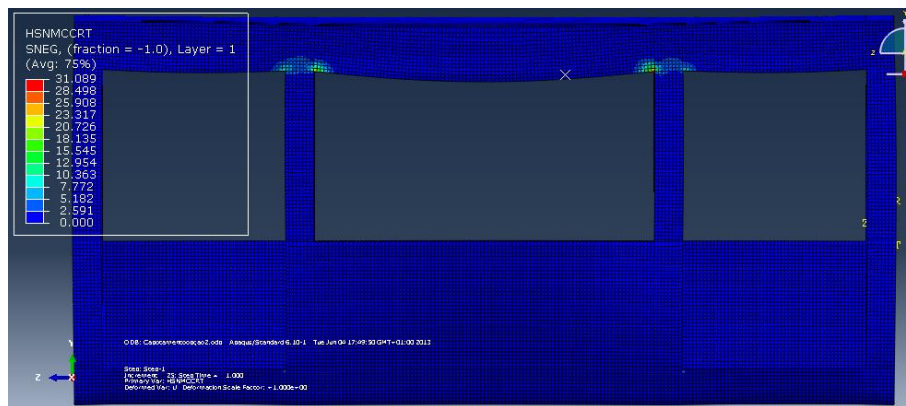


Figura 66 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central carroçaria da segunda opção analisada

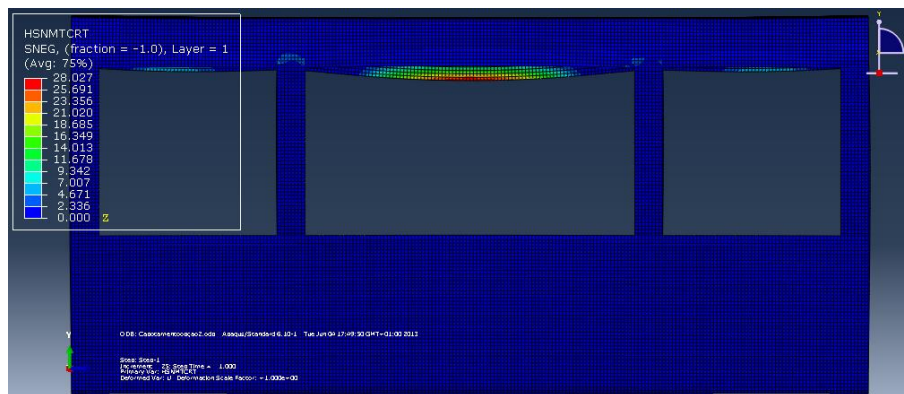


Figura 67 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria da segunda solução encontrada

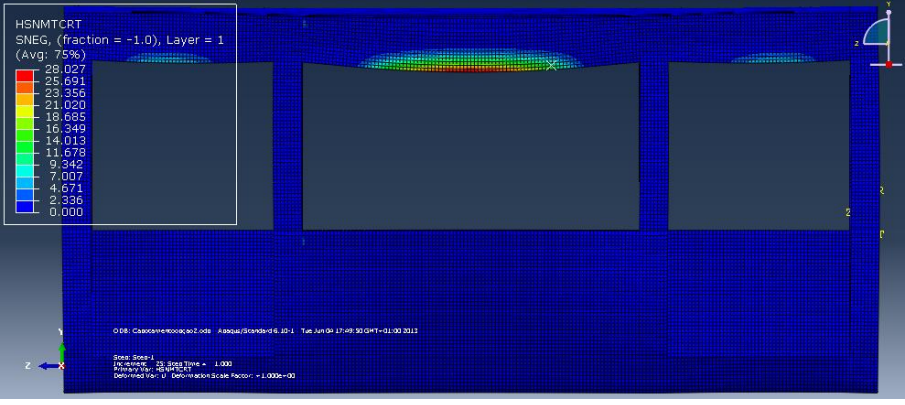


Figura 68 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central carroçaria da segunda opção analisada

Analisando os resultados obtidos verifica-se uma melhoria do comportamento da estrutura. Sabendo-se que a intensidade das forças se manteve inalterada desde o ensaio anterior verifica-se que a deformação da estrutura tem uma redução significativa, deixando a carroçaria de constituir um perigo para os passageiros. Com estes resultados era possível a homologação do autocarro para ciclos não urbanos. Uma vez que a deformação causada pelo choque não invade nem é invadida pela área residual de segurança que para efeitos de simulação é representada como um bastidor rígido e indeformável de dimensões iguais ao estabelecido no regulamento.

Relativamente aos danos causados na estrutura verifica-se uma melhoria dos resultados obtidos com o aumento da espessura dos pilares. No entanto, ainda nos encontra-mos no limite da propagação do dano á compressão da fibra existindo ainda uma propagação do dano na matriz devido as forças compressivas na região dos pilares e a meio vão da janela do lado direito. Os esforços de tração a que a estrutura estará sujeita durante o choque provocarão uma proliferação dos danos na região superior dos pilares do lado esquerdo, no entanto esses mesmos danos ficaram circunscritos a essas zonas. Com esta solução já foi conseguido impedir a propagação do dano á tração das fibras.

Como com esta solução ainda não conseguimos impedir a proliferação do dano nos pilares e não querendo aumentar a espessura da sanduiche nem o número de camadas do laminado, por razões de contenção do peso final da estrutura decidimos experimentar substituir a espuma de PVC até então utilizada por um ninho de abelha de referência HRH-10-1/4-4 com as suas principais características mecânicas já expostas anteriormente no ponto 2.2 dos trabalhos práticos. Esta solução apesar de permitir uma redução dos valores da deformação, não impedia a propagação do dano verificada nos ensaios anteriores. Como tal e devido ao preço superior do material utilizado e às limitações que coloca ao processo de SCRIMP não achamos interessante esta solução.

Voltando a utilizar um núcleo de PVC decidimos manter a espessura dos pilares, mas adicionamos mais camadas de fibra orientadas a 0 graus de acordo com o lay-up apresentado no ponto 3 dos trabalhos práticos com o nome Pilares opção 3.

As próximas figuras são representativas dos resultados do ensaio efetuado.

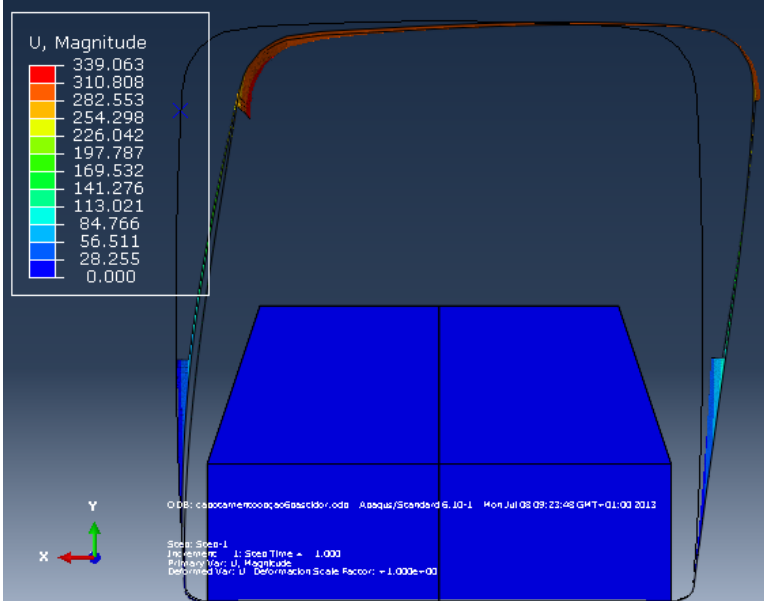


Figura 69 Vista de frente da deformação causada pelo ensaio de capotamento estático para a 4ª opção estudada (fator de escala de 1X)

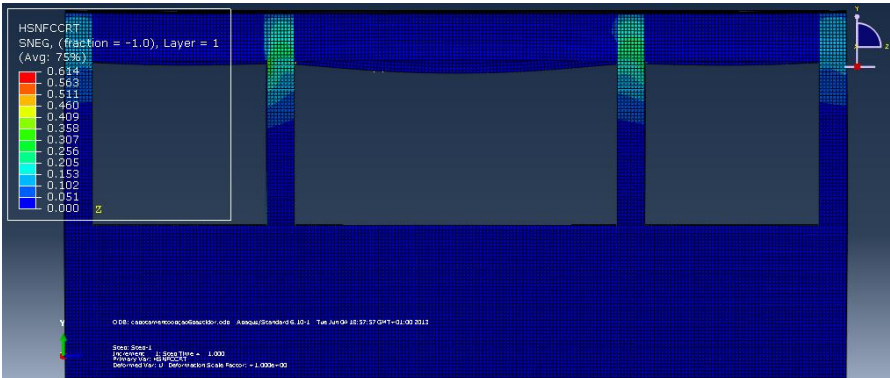


Figura 70 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central carroçaria para a quarta solução encontrada

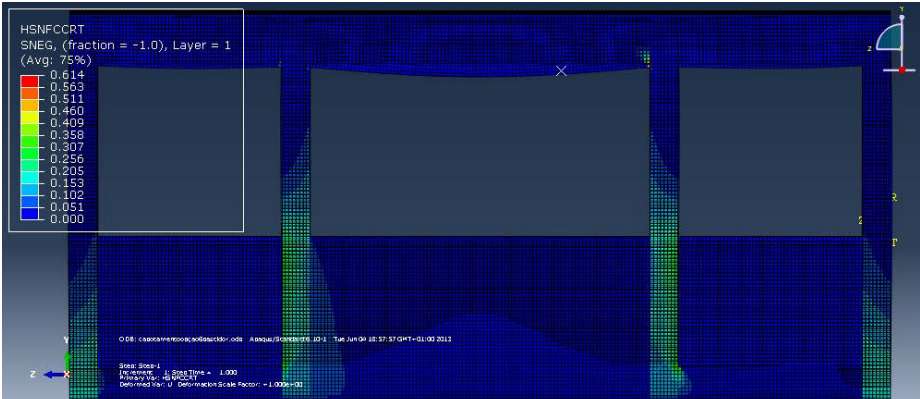


Figura 71 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central carroçaria para a quarta solução encontrada

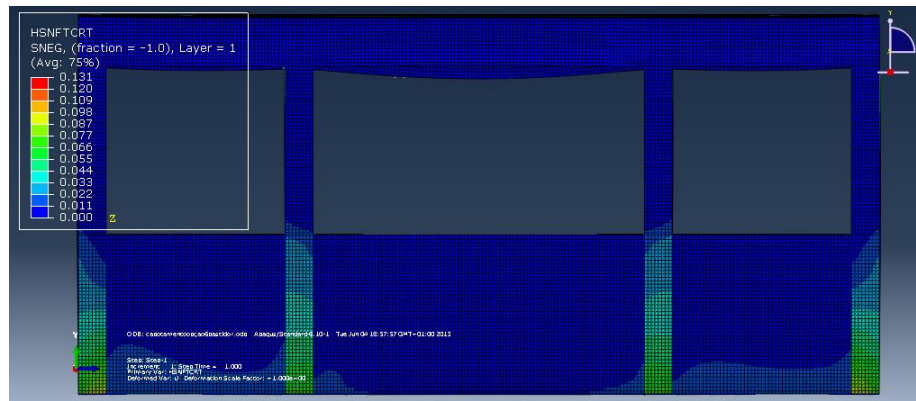


Figura 72 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral esquerda da secção central carroçaria da quarta solução encontrada

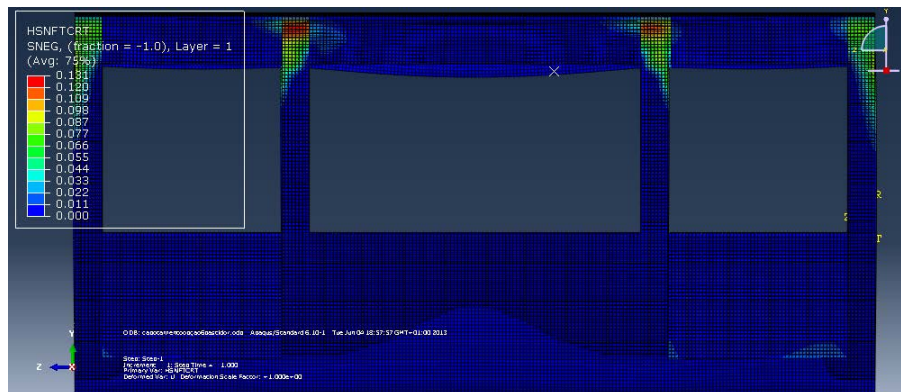


Figura 73 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral direita da secção central carroçaria da quarta solução encontrada

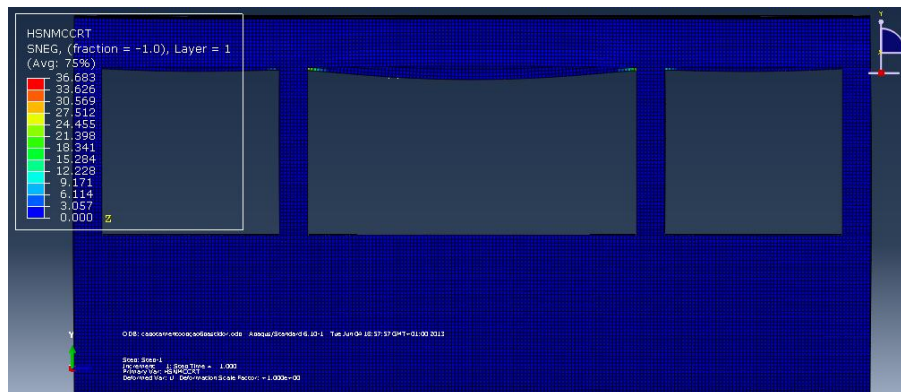
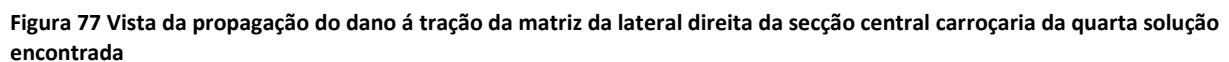
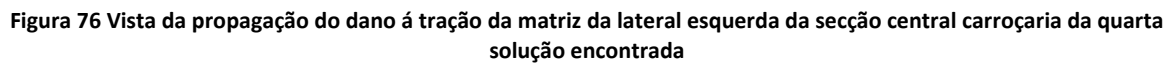
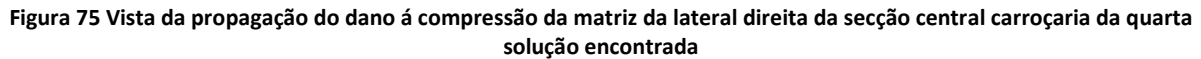


Figura 74 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria da quarta solução encontrada



Tendo em consideração que não é expectável que uma estrutura com esta tipologia suporte um impacto deste género sem qualquer tipo de dano e que para o impedirmos necessitávamos de utilizar uma maior quantidade de material ou em alternativa recorrer a materiais mais caros. A utilização de uma maior quantidade de material por um lado impediria a redução de peso esperada e por outro aumentava o custo final do autocarro dificultando a sua implementação no mercado.

Mesmo assim fomos estudar uma última solução em que sem aumentar a espessura da sandwich alteramos a sua sequência de empilhamento. Esta solução passa por adicionamos camadas a 0 graus e diminuirmos um pouco a espessura do núcleo.

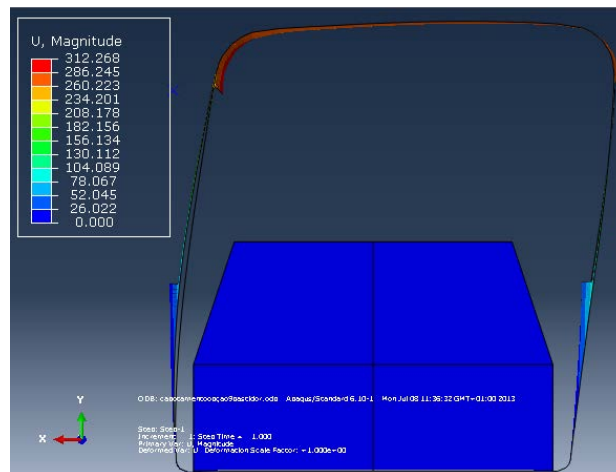


Figura 78 Vista de frente da deformação causada pelo ensaio de capotamento estático para a 5ª opção estudada (fator de escala de 1X)

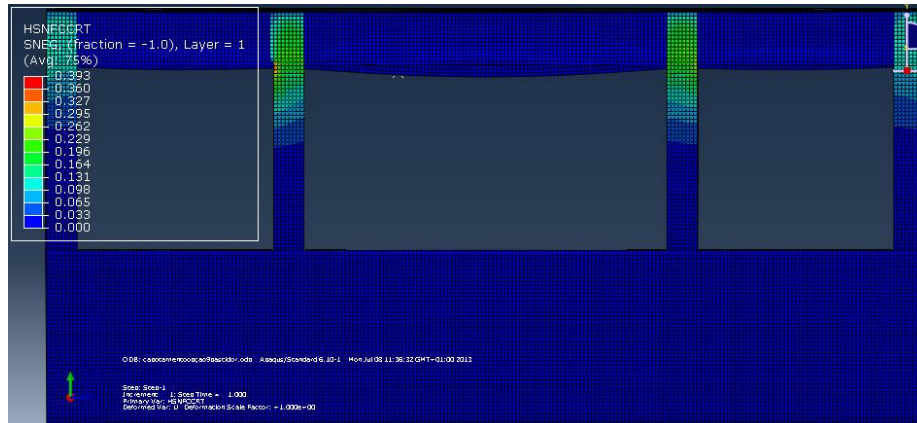


Figura 79 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria para a quinta solução encontrada

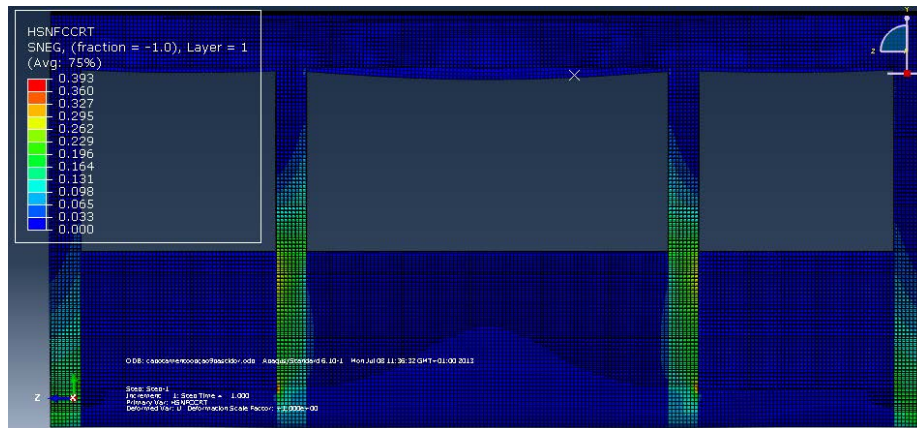


Figura 80 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria para quinta solução encontrada

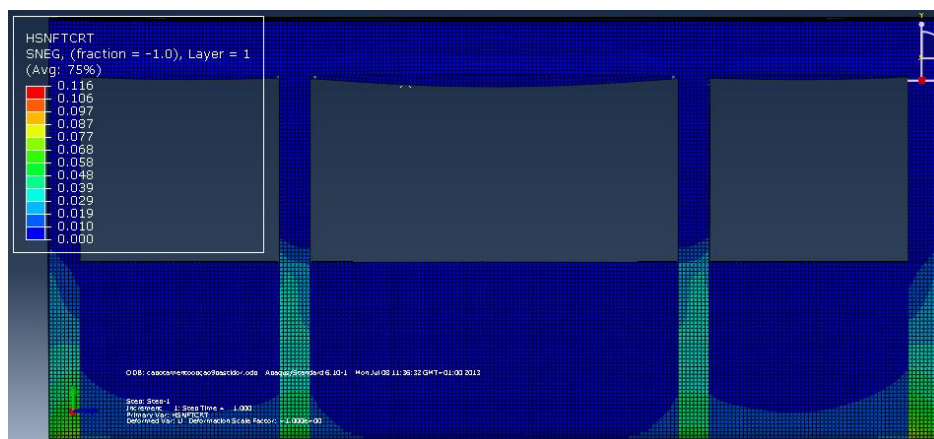


Figura 81 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral esquerda da secção central da carroçaria da quinta solução encontrada

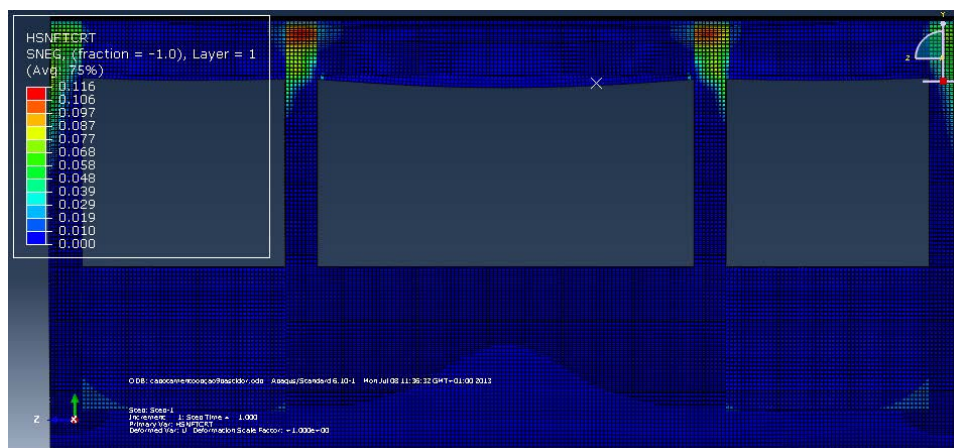


Figura 82 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral direita da secção central da carroçaria da quinta solução encontrada

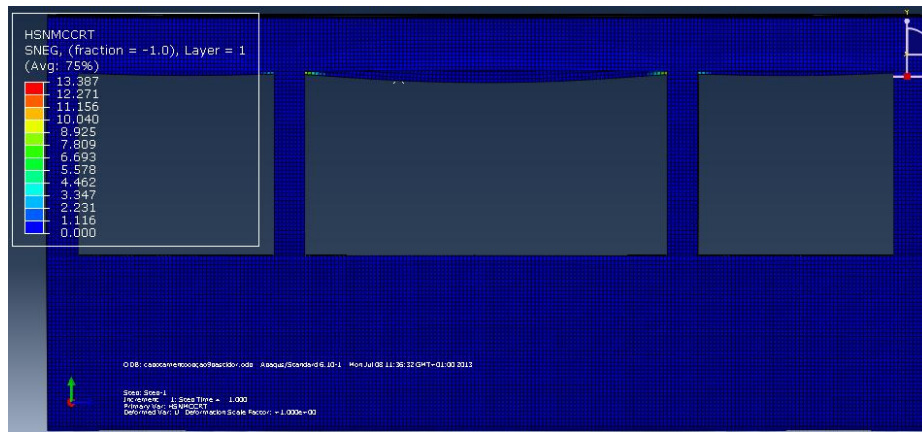


Figura 83 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria da quinta solução encontrada

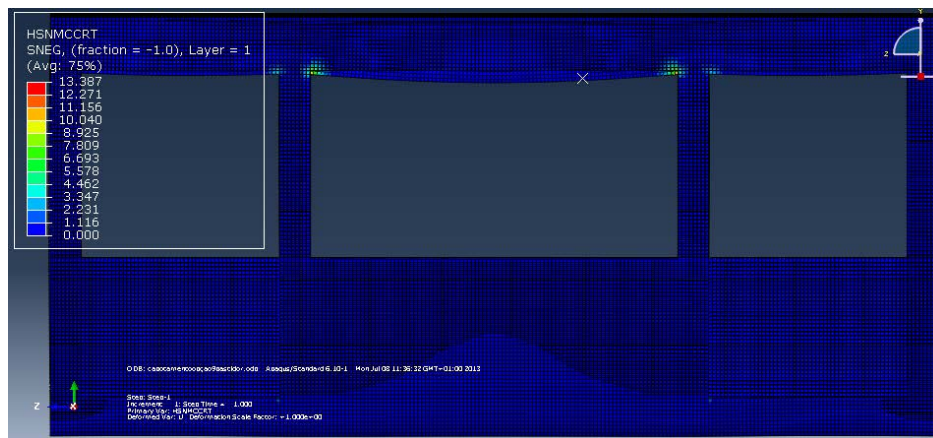


Figura 84 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central da carroçaria da quinta solução encontrada

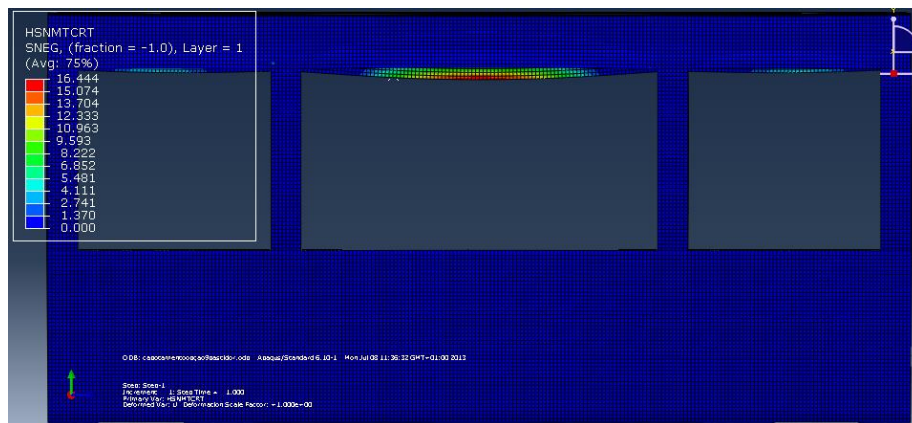


Figura 85 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria da quinta solução encontrada

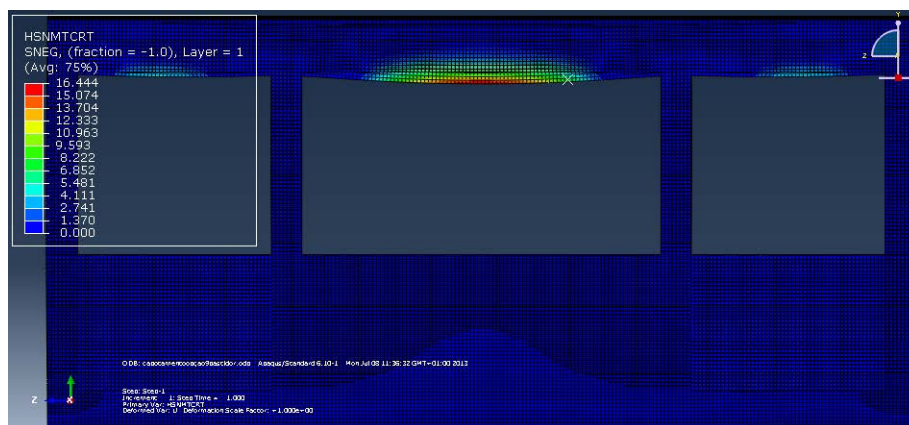


Figura 86 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central da carroçaria da quinta solução encontrada

Os resultados desta última simulação demonstram uma redução não muito significativa do dano, verificando-se que continua a existir uma propagação do dano na matriz do laminado o que conduzirá à rotura da estrutura nessa região. Para impedir essa mesma propagação poderiam ser experimentadas outras opções de empilhamento ou a utilização de outros materiais. Não havendo tempo para realizar essas mesmas experimentações, nem interesse em conceber uma estrutura sem dano quando sujeita a capotamento opta-mos por considerar a opção quatro como a melhor proposta para a produção da carroçaria do autocarro. Assim sendo, nas próximas análises apenas será estudado a resposta da estrutura otimizada às solicitações exercidas.

4.3. Análise da carroçaria sujeita colisão frontal

O teste de colisão frontal estabelecido consiste em realizar um embate da frente do veículo contra um corpo rígido provocando uma desaceleração de 6g no autocarro. Assim, calculamos as forças que estão instaladas em cada um dos nós nas componentes axial e vertical.

Na colisão frontal, manifesta-se um comportamento dos componentes mássicos do veículo semelhante a uma situação de travagem. Assim, o sentido das forças axiais coincide com o sentido do movimento, por isso estão apontadas para a frente.

A zona de embate incide sobre a extremidade dianteira do veículo. Portanto, para efeitos de simulação, consideramos que a secção central da carroçaria se encontrava encastrada de forma similar ao utilizado no ensaio de capotamento. Neste ensaio, estes apoios destinam-se a permitir que toda a energia da colisão seja absorvida pela estrutura da carroçaria, sem que hajam ricochetes e desvios laterais da traseira e as rodas permanecem em contacto com o solo, bem como travar completamente o movimento na direção axial (z), para a frente ou para trás. Para além do peso próprio da estrutura e da sua aceleração para este ensaio foram também consideradas mais 3 massas concentradas de 100 quilogramas colocadas 100 milímetros acima do teto da viatura por forma a representar os diversos equipamentos aí localizados (tipicamente equipamentos de ar condicionado). Estas massas são consideradas para efeitos de simulação como elementos de elevada rigidez e encontram-se ligadas á estrutura da carroçaria através de barras indeformáveis.

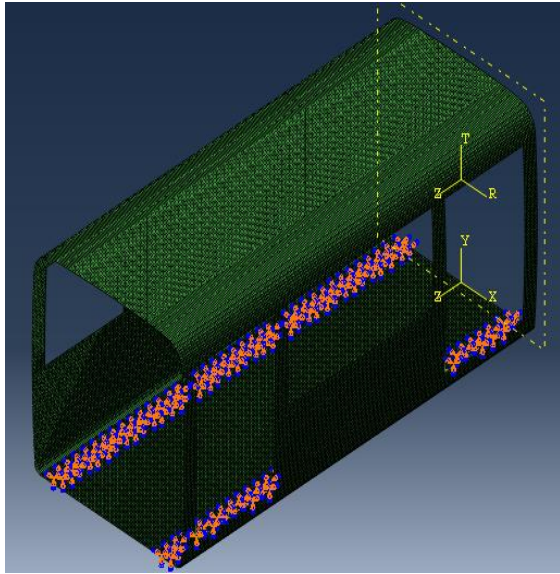


Figura 87 Representação dos apoios na secção central para a análise de uma colisão frontal

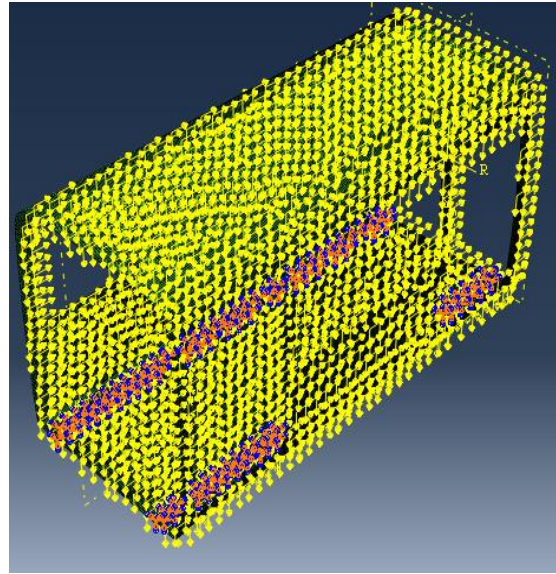


Figura 88 Representação cargas instaladas na secção central para a análise de uma colisão frontal

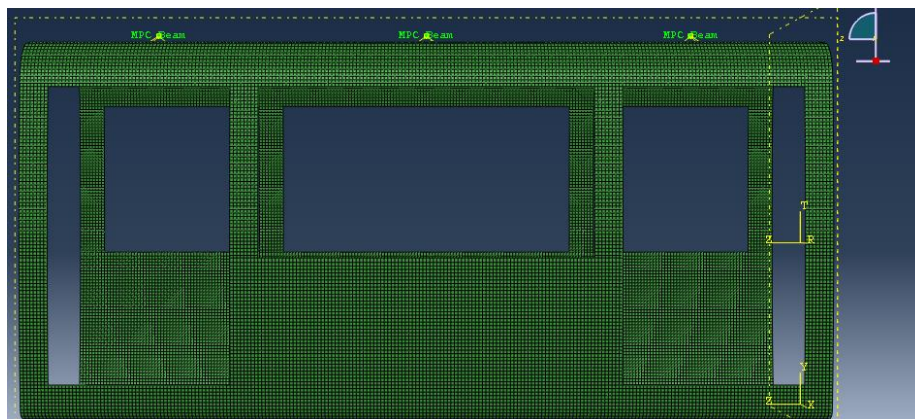


Figura 89 Representação da localização das massas concentradas representativas dos sistemas auxiliares

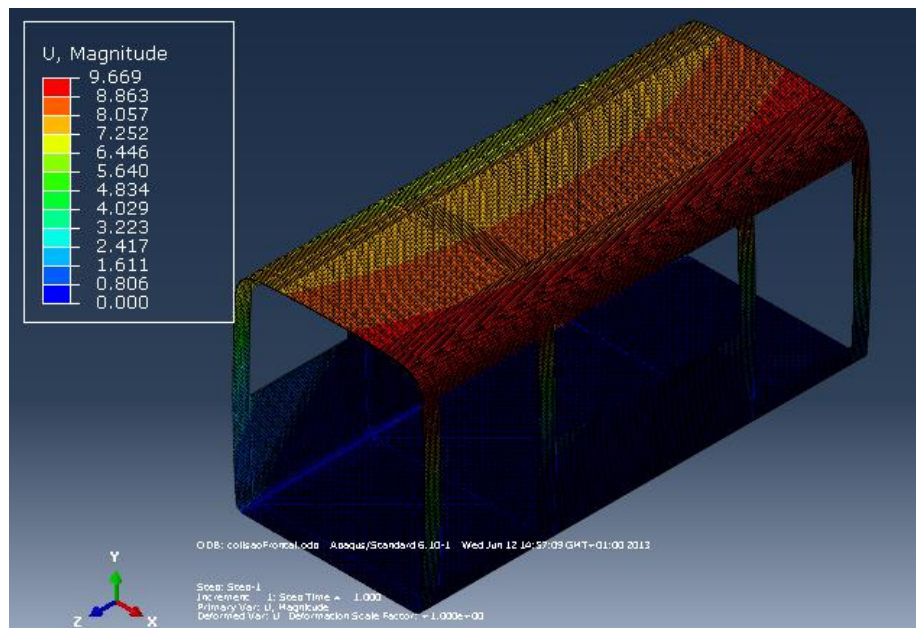


Figura 90 Vista tridimensional das deformações resultantes do ensaio de colisão frontal (fator de escala de 1x)

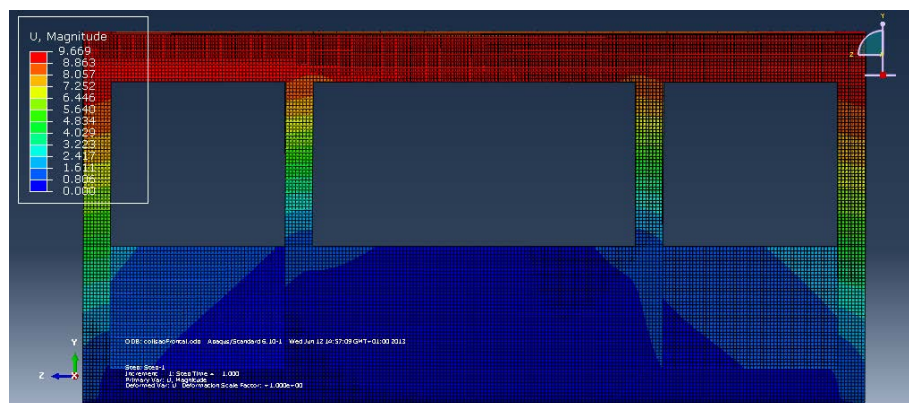


Figura 91 Vista lateral direita das deformações resultantes do ensaio de colisão frontal (fator de escala de 1x)

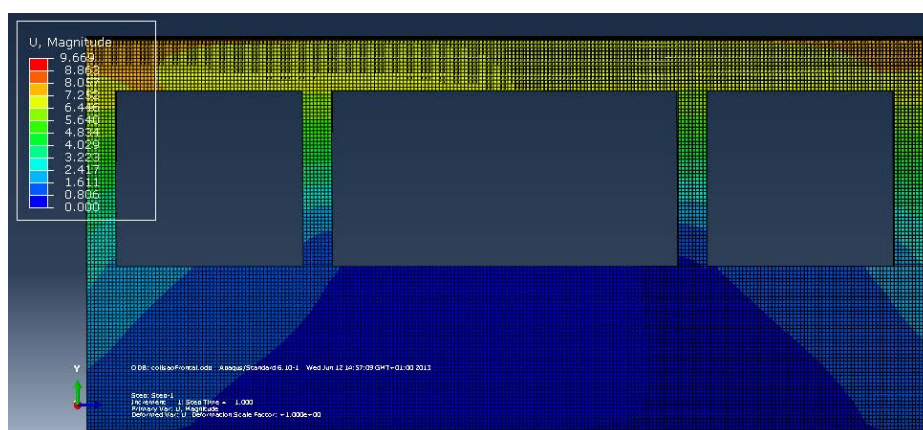


Figura 92 Vista lateral esquerda das deformações resultantes do ensaio de colisão frontal (fator de escala de 1x)

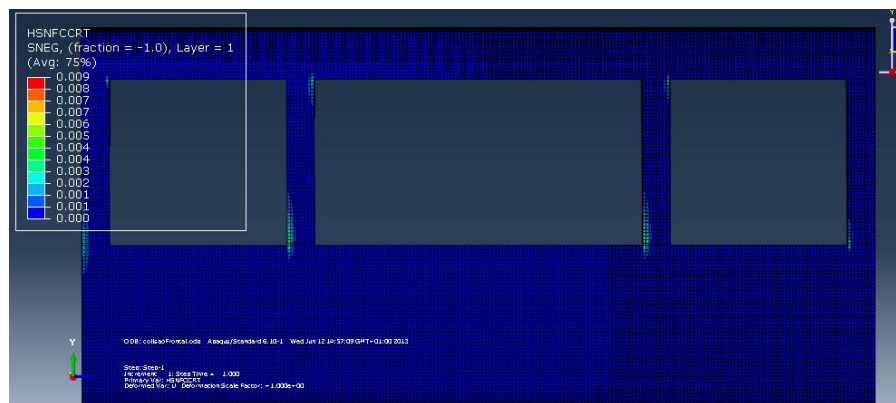


Figura 93 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal

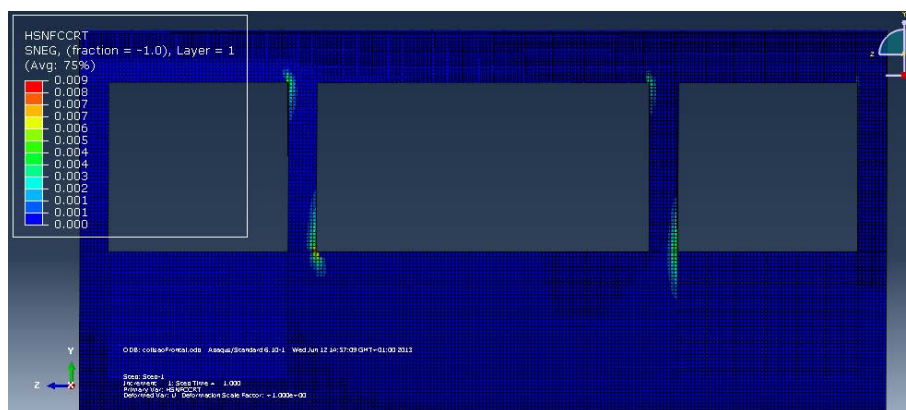


Figura 94 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal

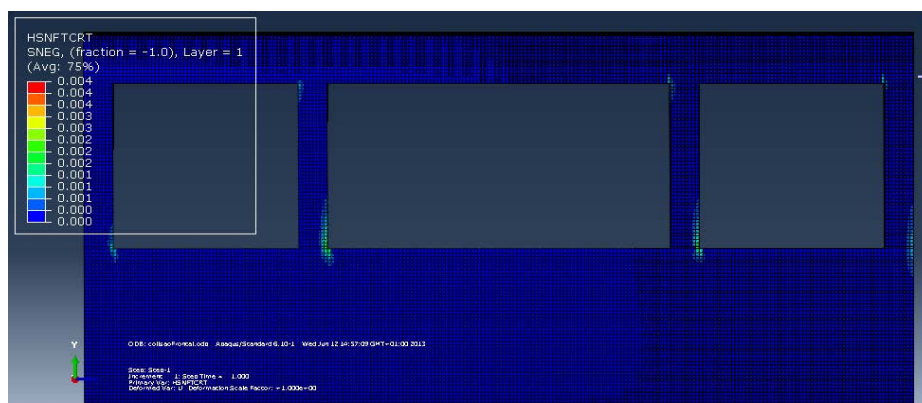


Figura 95 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal

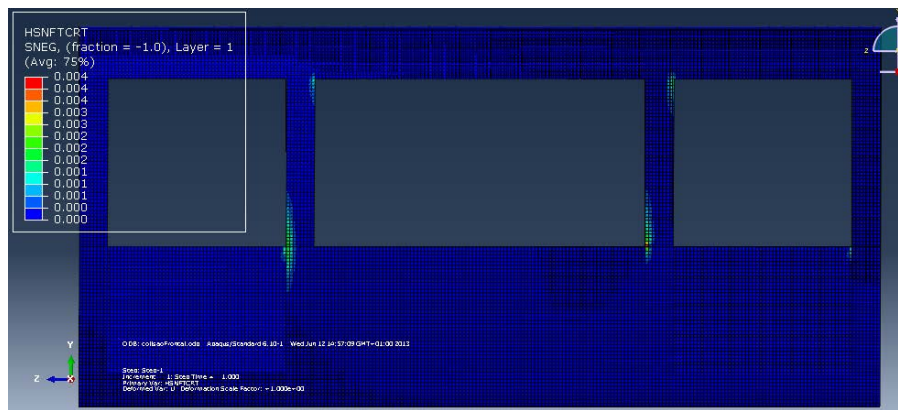


Figura 96 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal



Figura 97 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal

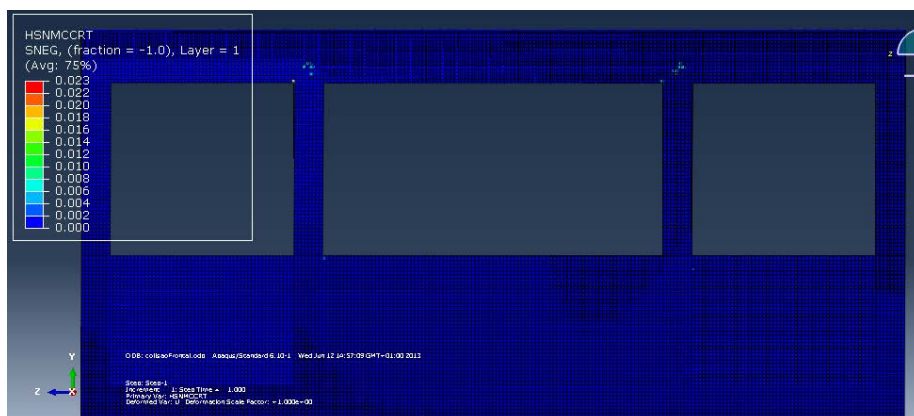


Figura 98 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal

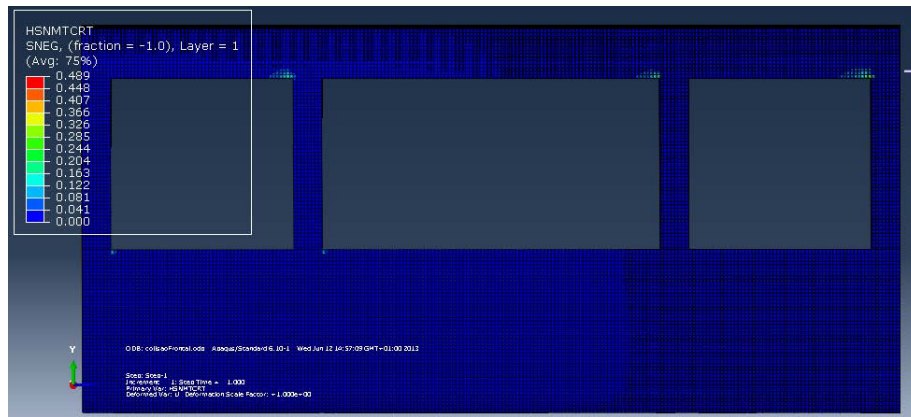


Figura 99 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal

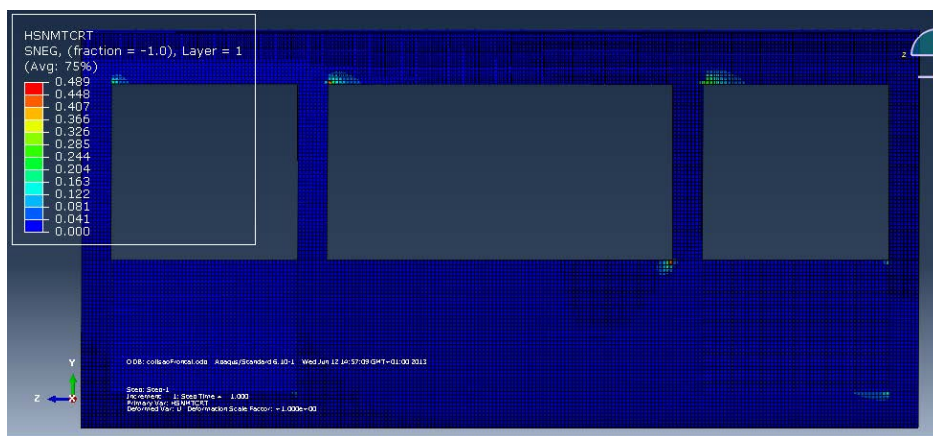


Figura 100 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão frontal

Analisando os resultados obtidos verifica-se que os valores de deformação são bastante inferiores aos verificados no ensaio de capotamento. Analisando as zonas mais sacrificadas com este tipo de ocorrência podemos dizer que as zonas de maior deformação se situam ao nível do teto da viatura. Se pretendermos ser mais rigorosos na análise podemos dizer que, tal como seria de esperar, devido á existência das portas do lado direito da viatura as deformações ocorridas neste lado são de valor superior às verificadas no lado esquerdo.

No entanto para os valores de solicitação impostos não se verifica o início da propagação do dano do material compósito em nenhuma das secções da estrutura.

4.4. Análise da carroçaria sujeita a uma colisão lateral

Para testar a resistência da estrutura a colisões laterais considera-mos que a carroçaria sofreria uma colisão contra um corpo rígido provocando uma desaceleração de 4g no Autocarro. Assim, calculamos as deformações em cada um dos nós nas componentes axiais e vertical. Tal como no ensaio de colisão frontal além do peso próprio da estrutura e da sua aceleração para este ensaio foram também consideradas as 3 massas representativas dos sistemas auxiliares mencionadas no ensaio anterior.

Na colisão lateral, manifesta-se um comportamento dos componentes mássicos do autocarro igual á de uma situação de travagem, apenas a direção das forças é perpendicular á situação de travagem. Por isso estão apontadas para o lado aonde ocorre o impacto.

Serão realizados dois ensaios, um em que a zona de embate incide sobre a extremidade lateral direita do veículo e o outro exatamente igual em que a zona de impacto é o lado esquerdo do veículo. Relativamente á ligação ao solo da estrutura central do autocarro consideramos o mesmo tipo de apoios que vínhamos a usar no ensaio de capotamento. Neste ensaio, estes apoios destinam-se a permitir que toda a energia da colisão seja absorvida nas laterais do veículo evitando ricochetes, bem como impedir o movimento na direção axial (z).

4.4.1. Análise da carroçaria sujeita a uma colisão lateral do lado direito

Neste ensaio considera-se que o corpo rígido colide a 90° com o autocarro.

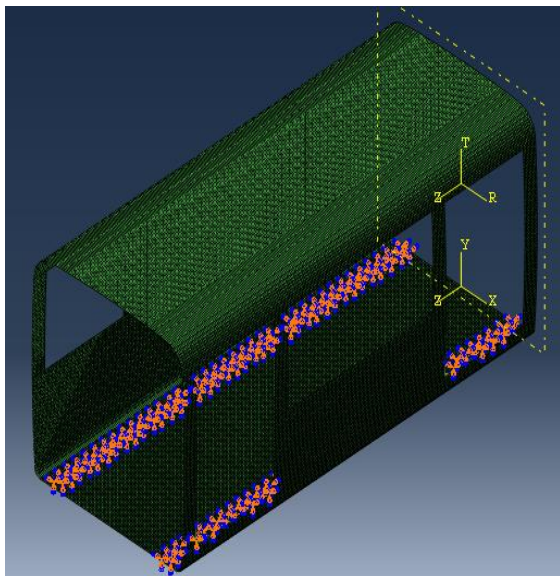


Figura 101 Representação dos apoios na secção central para a análise de uma colisão lateral do lado direito

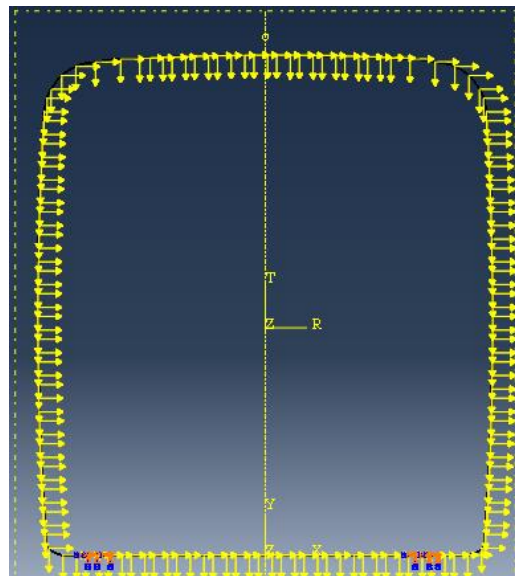


Figura 102 Representação cargas instaladas na secção central para a análise de uma colisão lateral do lado direito

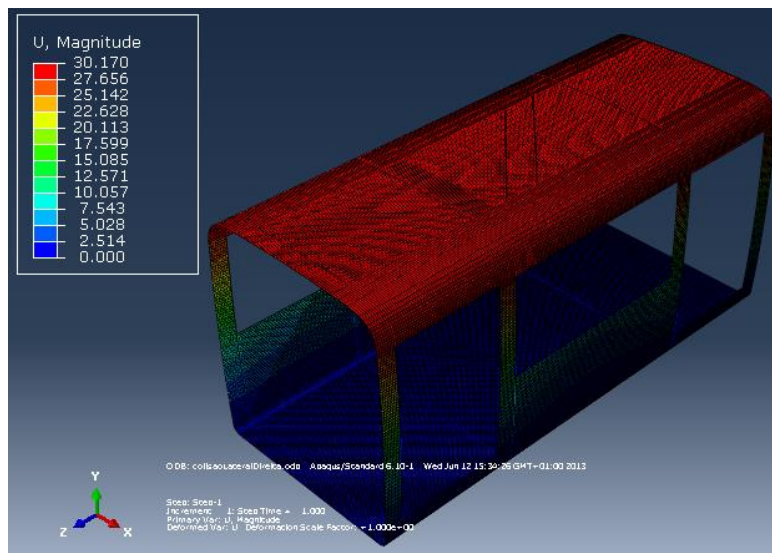


Figura 103 Vista tridimensional das deformações resultantes do ensaio de colisão na lateral direita do autocarro(fator de escala de 1x)

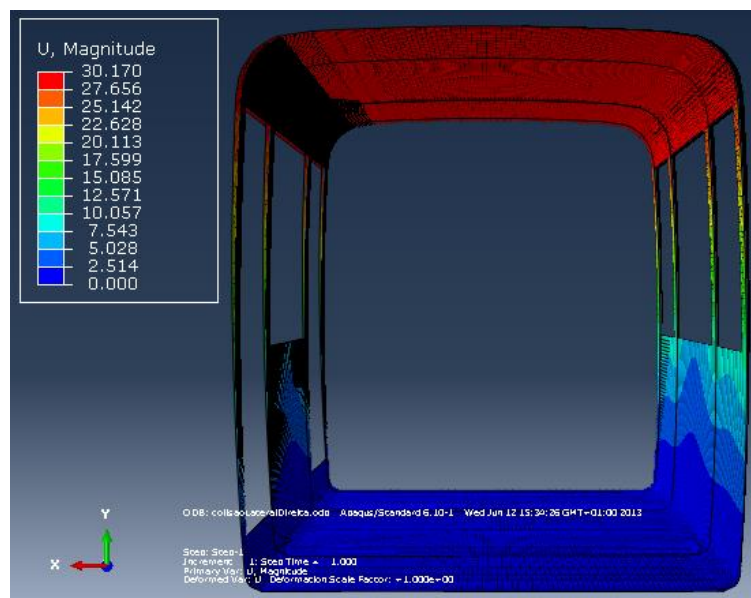


Figura 104 Vista de frente das deformações resultantes do ensaio de colisão na lateral direita do autocarro (fator de escala de 1x)

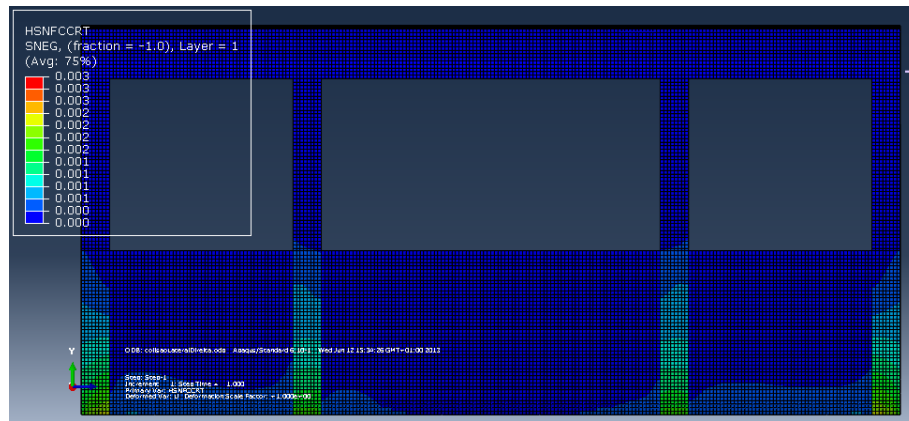


Figura 105 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro

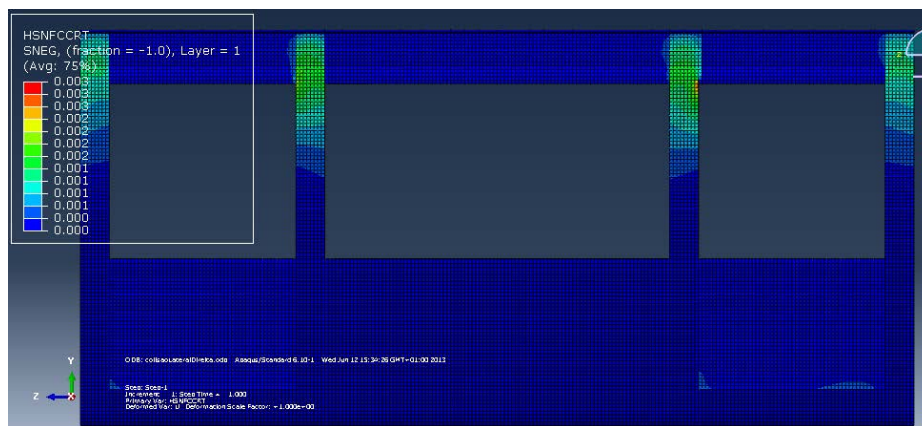


Figura 106 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro

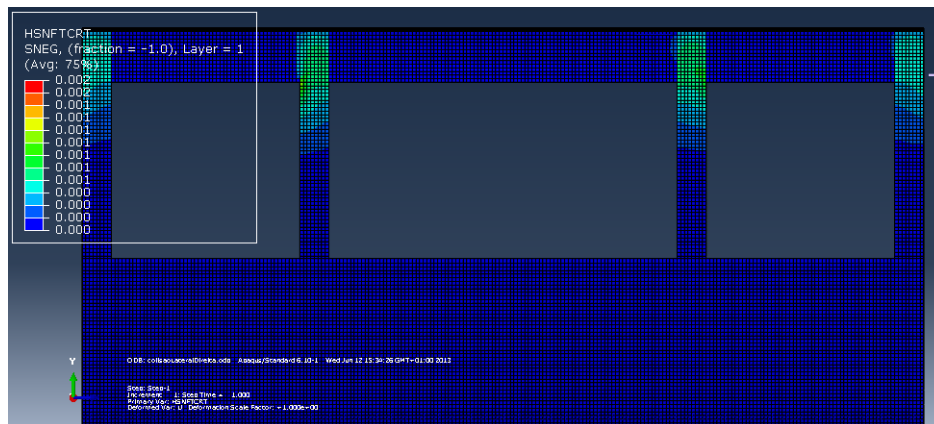


Figura 107 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro

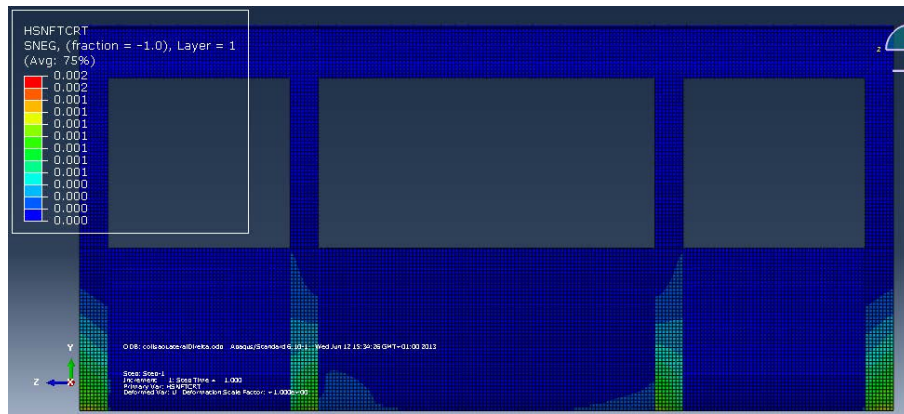


Figura 108 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro

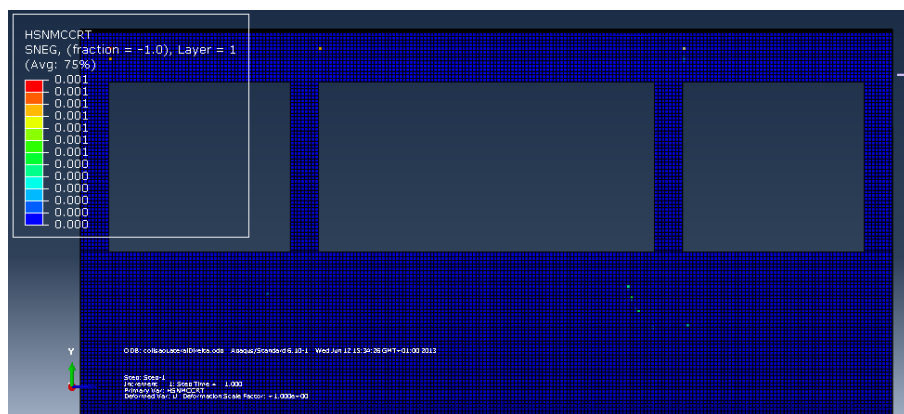


Figura 109 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro

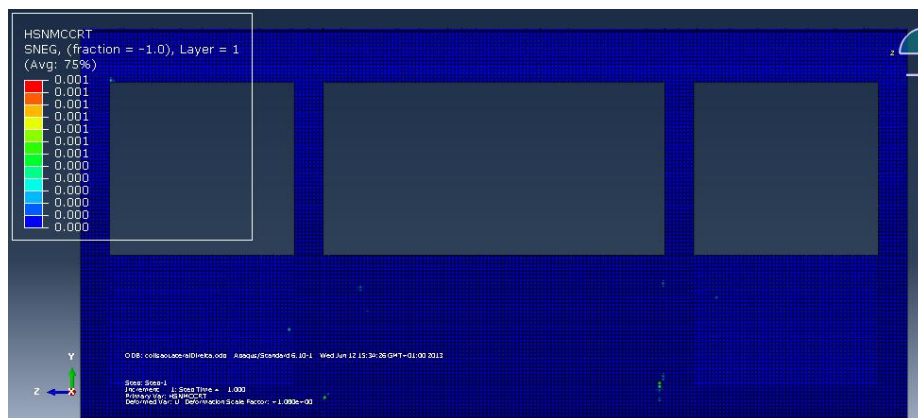


Figura 110 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro

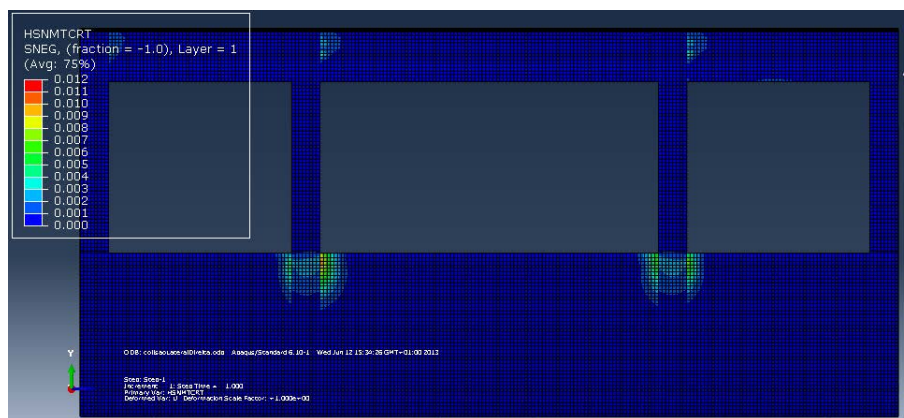


Figura 111 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro

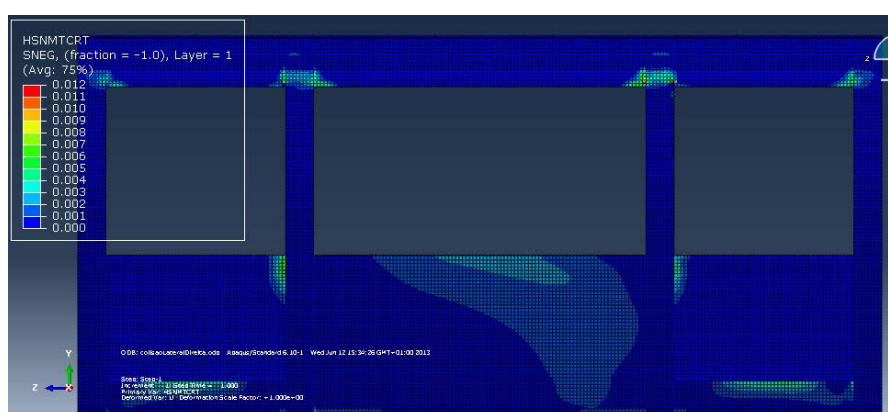


Figura 112 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral direita do autocarro

Dos resultados obtidos nesta simulação podemos concluir que, para a carga estabelecida no ensaio, não ocorrem danos estruturais na secção central da carroçaria. Tal como o verificado no ensaio de colisão frontal, os valores da deformação da superfície da carroçaria são muito inferiores aos verificados no ensaio de capotamento, não sendo invadida a zona residual de segurança dos passageiros. As regiões aonde se verificam as maiores deformações são o teto, lateral direita da viatura e a metade superior da lateral esquerda.

4.4.2. Análise da carroçaria sujeita a uma colisão lateral do lado esquerdo

Com este ensaio pretende-se estudar a colisão da lateral esquerda do autocarro a 90° com um corpo rígido. As forças aplicadas no corpo são de igual valor ao verificado no ensaio anterior mas de sentido contrário.

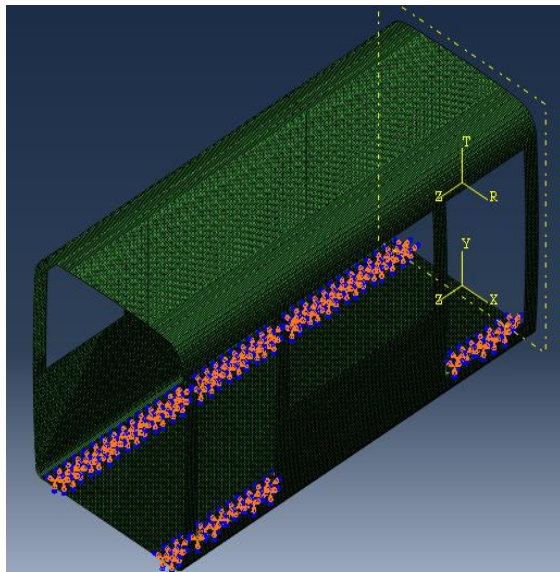


Figura 113 Representação dos apoios na secção central para a análise de uma colisão lateral do lado esquerdo

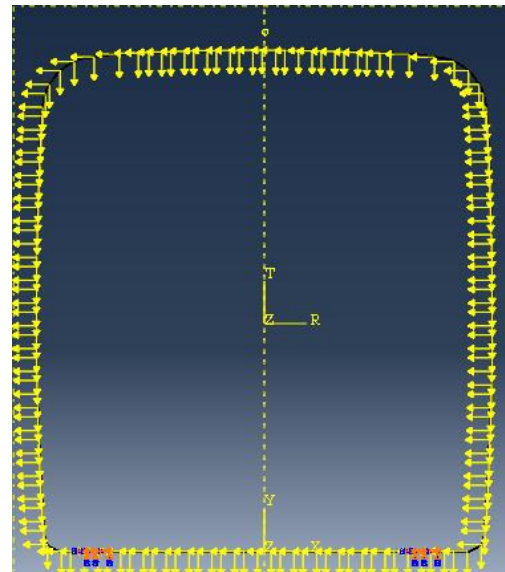


Figura 114 Representação cargas instaladas na secção central para a análise de uma colisão lateral do lado esquerdo

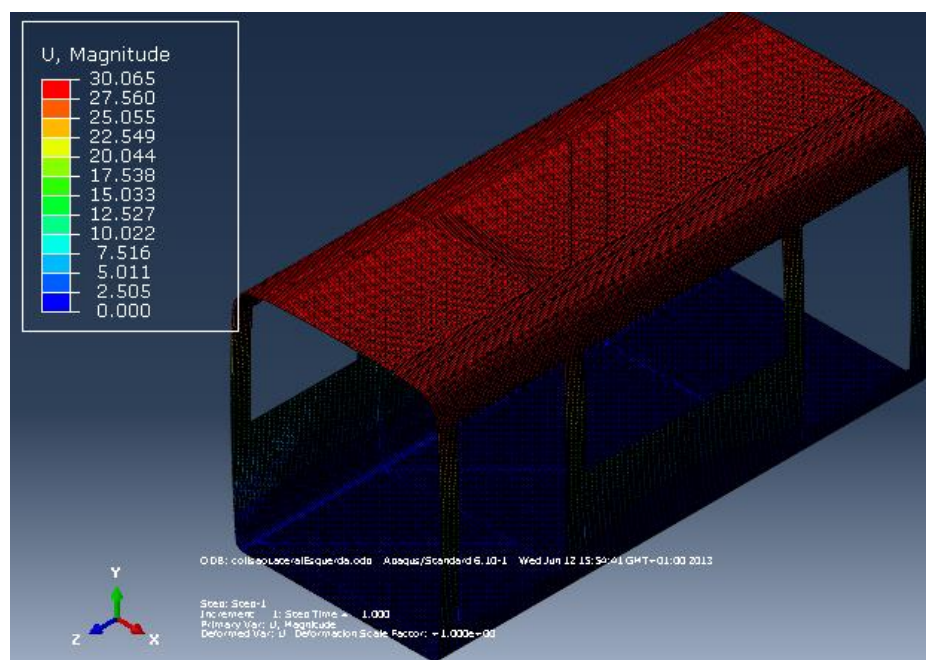


Figura 115 Vista tridimensional das deformações resultantes do ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro(fator de escala de 1x)

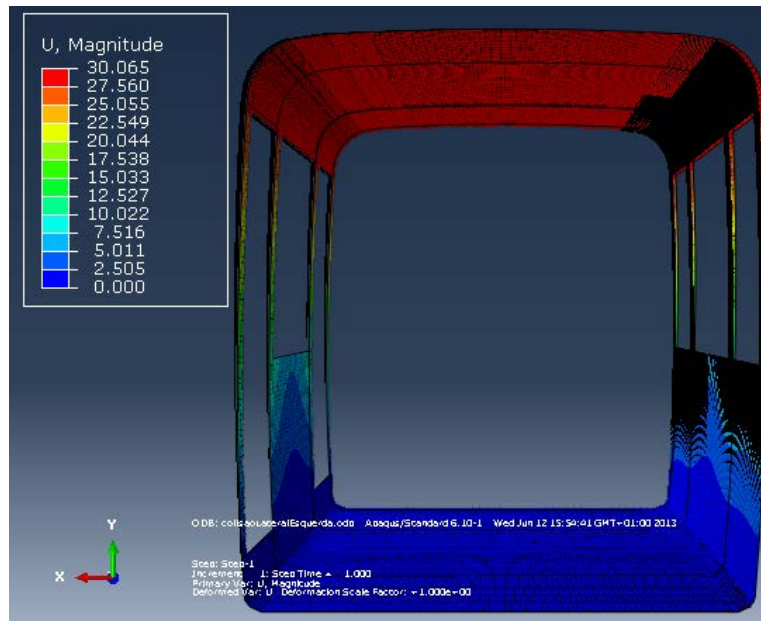


Figura 116 Vista de frente das deformações resultantes do ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro (fator de escala de 1x)

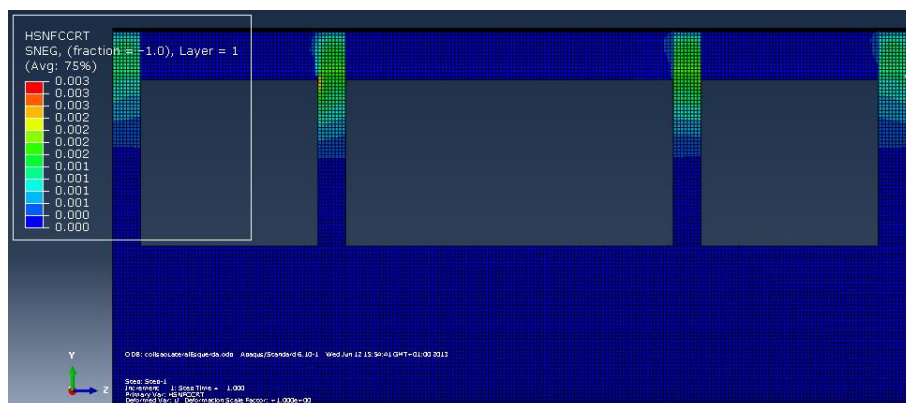


Figura 117 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro

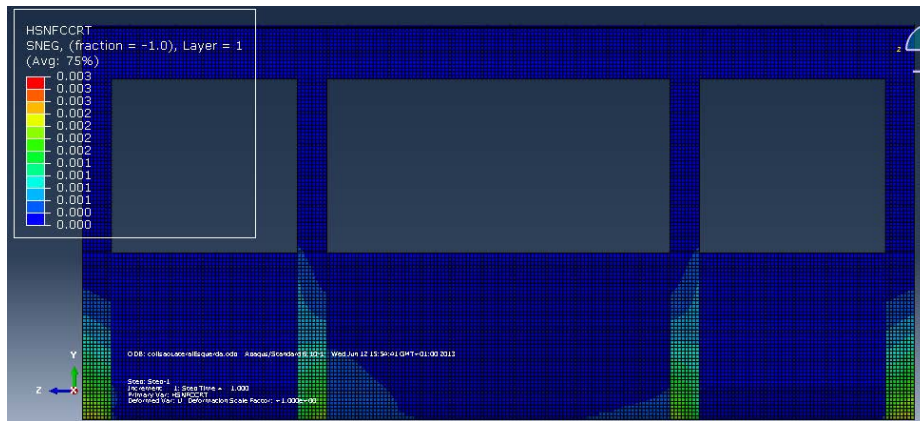


Figura 118 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro

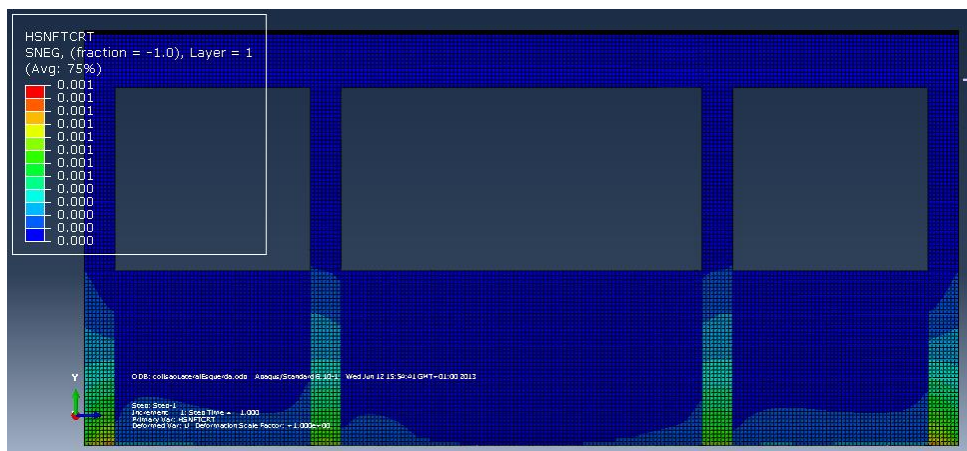


Figura 119 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro

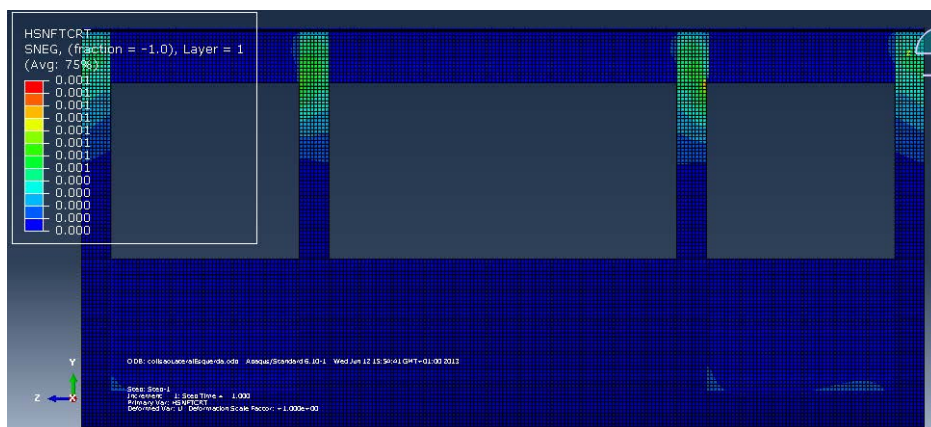


Figura 120 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro

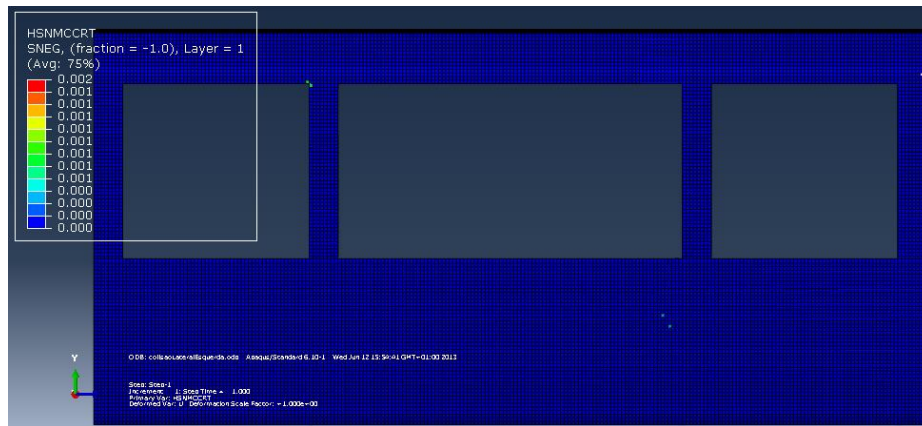


Figura 121 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro

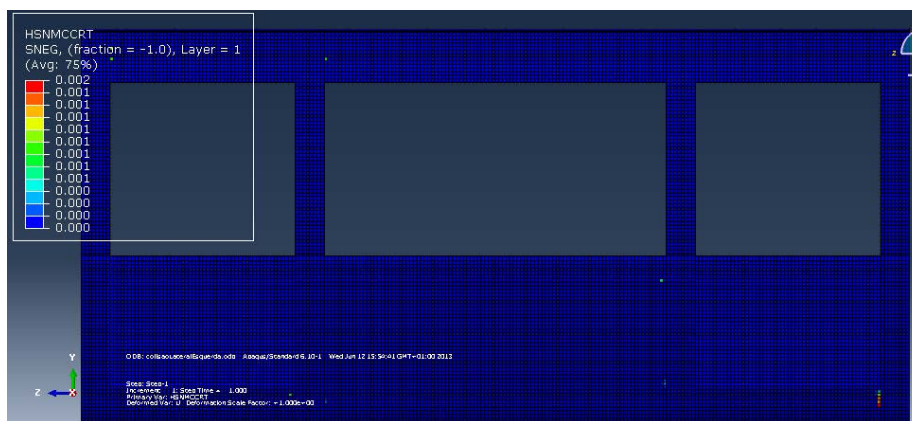


Figura 122 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro

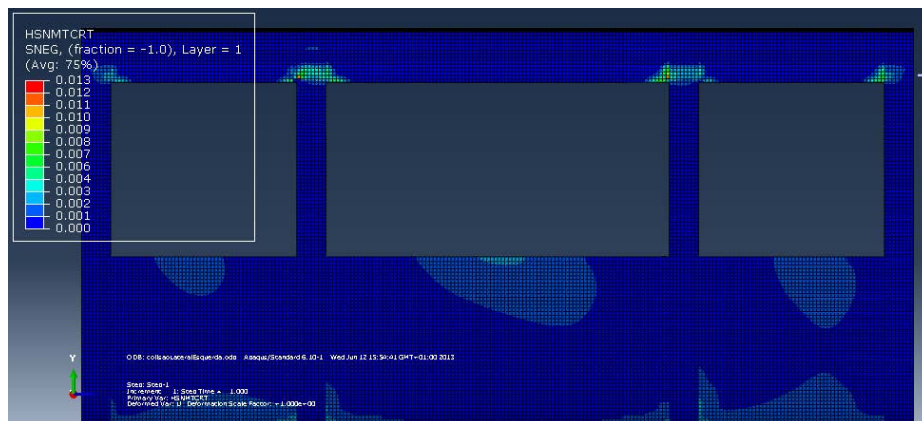


Figura 123 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro

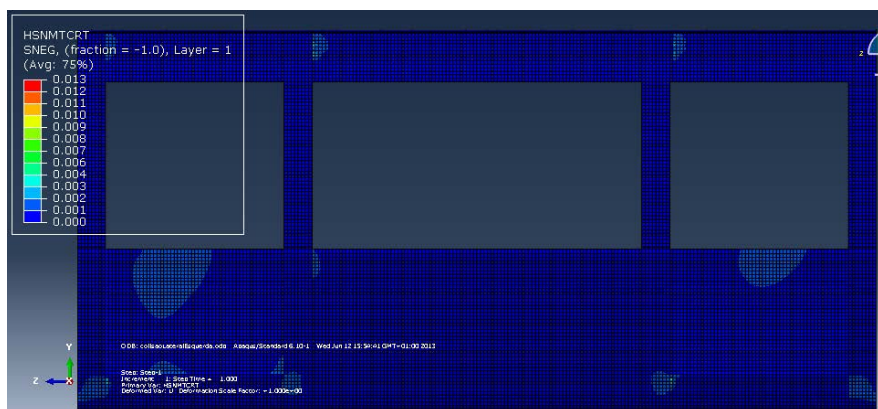


Figura 124 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão na lateral esquerda do autocarro

Sujeitando o modelo da secção central do autocarro a uma situação que pretende simular a colisão de um corpo com a lateral esquerda do autocarro verifica-se que as deformações obtidas na estrutura são, no teto da viatura, similares às deformações verificadas na colisão lateral direita. No entanto, a deformação na lateral sobre a qual ocorre a colisão é menor nesta simulação em comparação com os resultados da simulação anterior. Isto acontece porque esta região possui uma menor área aberta, tendo uma maior concentração de material o que lhe confere maior resistência mecânica.

De acordo com os parâmetros definidos anteriormente, para o início da propagação do dano de acordo com o critério de Hashin, constatamos que para este tipo de carregamento não provoca um dano estrutural na secção central da carroçaria.

4.5. Análise da carroçaria sujeita a uma colisão traseira

Numa utilização em contexto urbano é vulgar ocorrerem choques que envolvem a retaguarda do veículo que não devem ser desprezados, sob pena de a curto prazo poderem causar danos na transmissão ou no motor do veículo. O ensaio que fizemos pretende analisar essa situação para tal fizemos colidir a traseira do autocarro com um objeto rígido que provocará uma desaceleração média do autocarro de 6g. Portanto, as forças foram calculadas com essa desaceleração e colocadas nos nós em sentido contrário ao do movimento inercial que é imposto numa colisão deste tipo, isto é, apontadas para trás. Para além do peso próprio da estrutura e da sua aceleração para este ensaio foram também consideradas as 3 massas concentradas utilizadas nos restantes ensaios de colisão.

Quando um veículo sofre uma colisão traseira é animado de uma aceleração quase instantânea e sobre ele existirão forças, devido ao momento de inércia de massa contrárias ao movimento. A zona de embate recai essencialmente sobre os pontos que estão na extremidade traseira do veículo. Relativamente aos apoios mais uma vez consideramos que existe um encastramento no piso da carroçaria, representativo da zona de ligação entre o chassi e a carroçaria do autocarro.

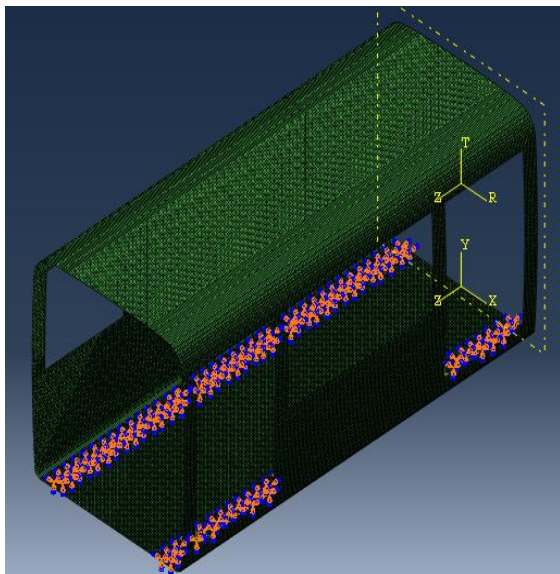


Figura 125 Representação dos apoios na secção central para a análise de uma colisão traseira

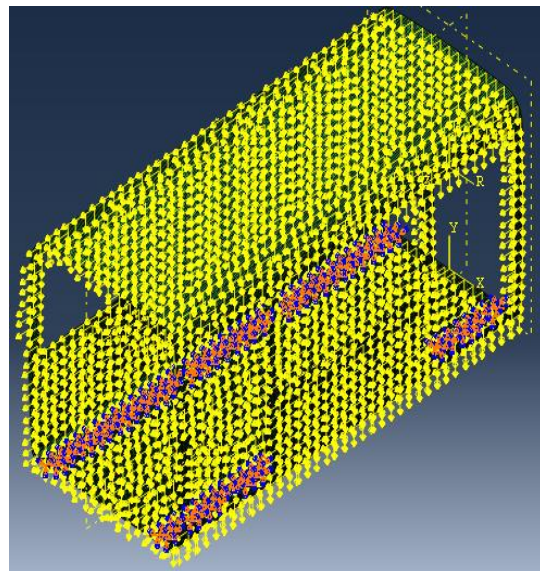


Figura 126 Representação cargas instaladas na secção central para a análise de uma colisão traseira

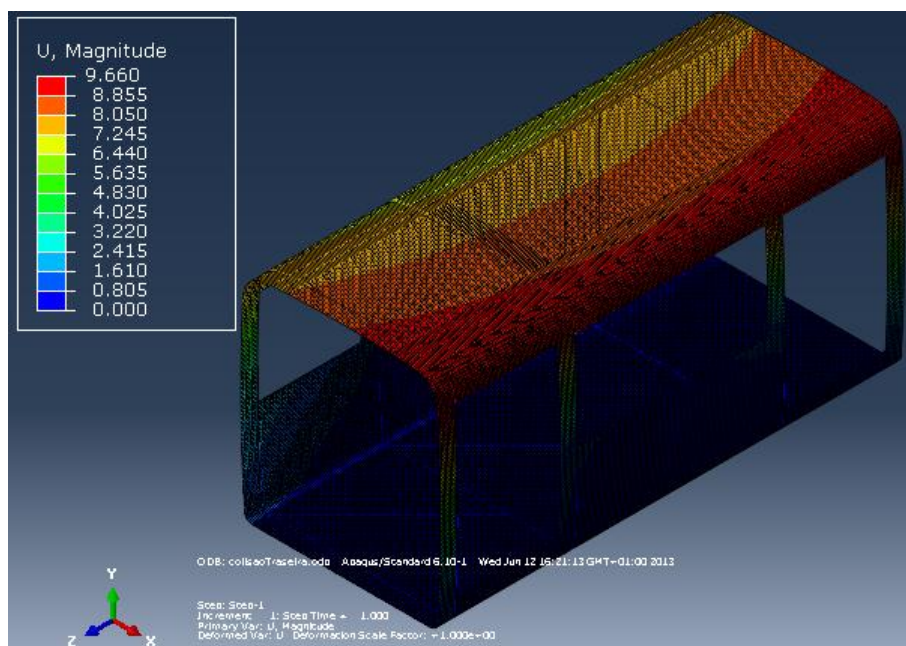


Figura 127 Vista tridimensional das deformações resultantes do ensaio de colisão traseira (fator de escala de 1x)

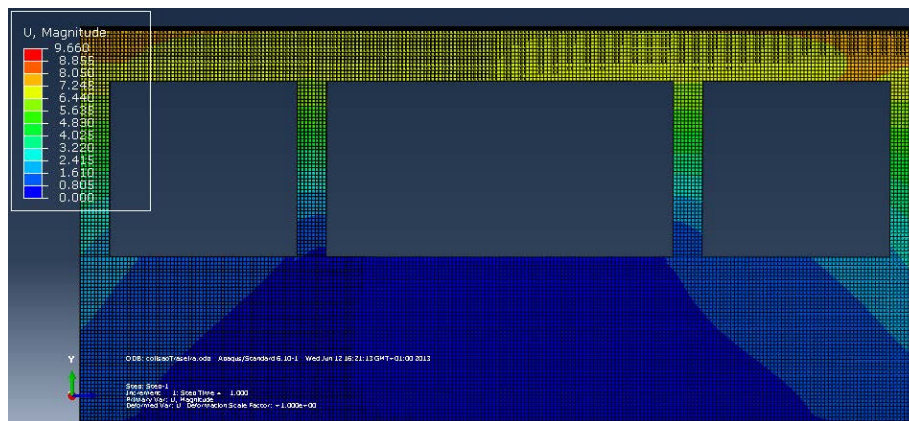


Figura 128 Vista lateral esquerda das deformações resultantes do ensaio de colisão traseira (fator de escala de 1x)

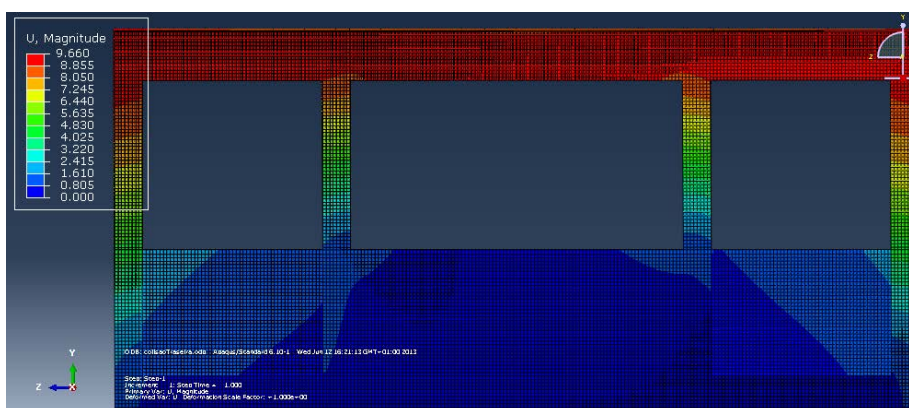


Figura 129 Vista lateral direita das deformações resultantes do ensaio de colisão traseira (fator de escala de 1x)

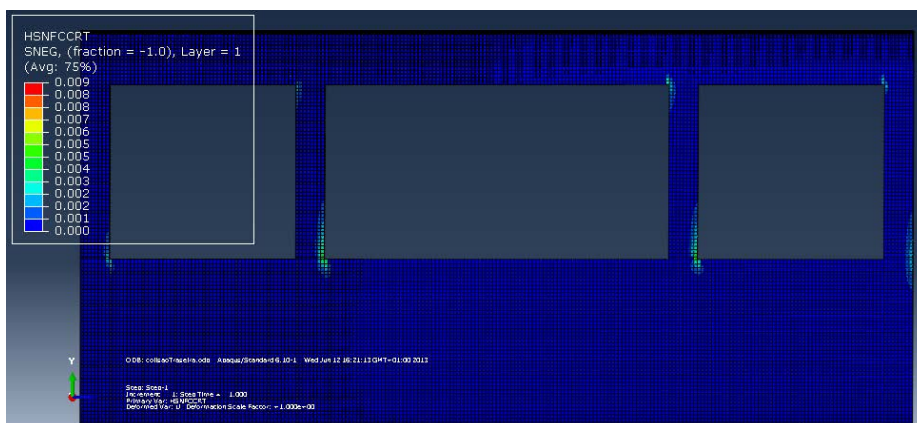


Figura 130 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira

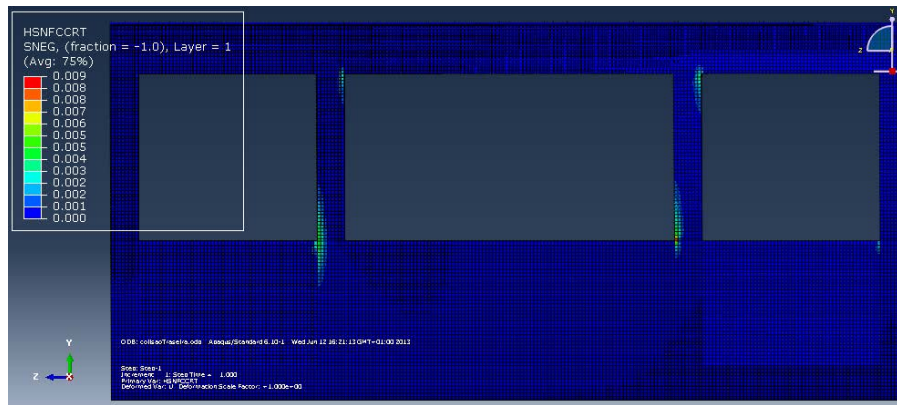


Figura 131 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira

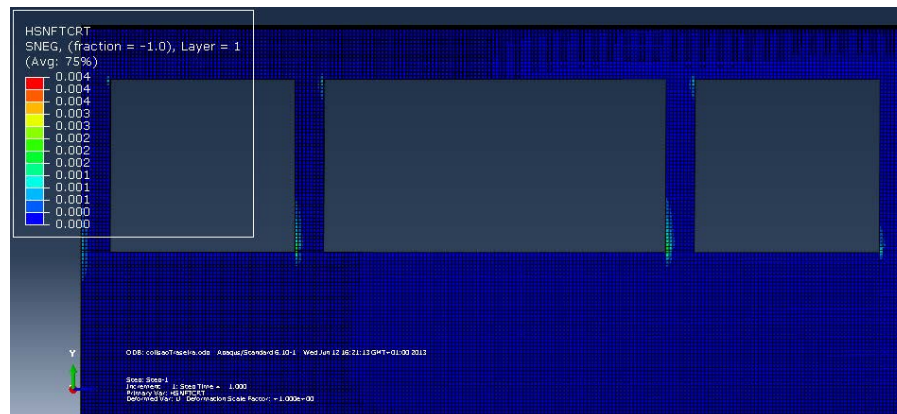


Figura 132 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira

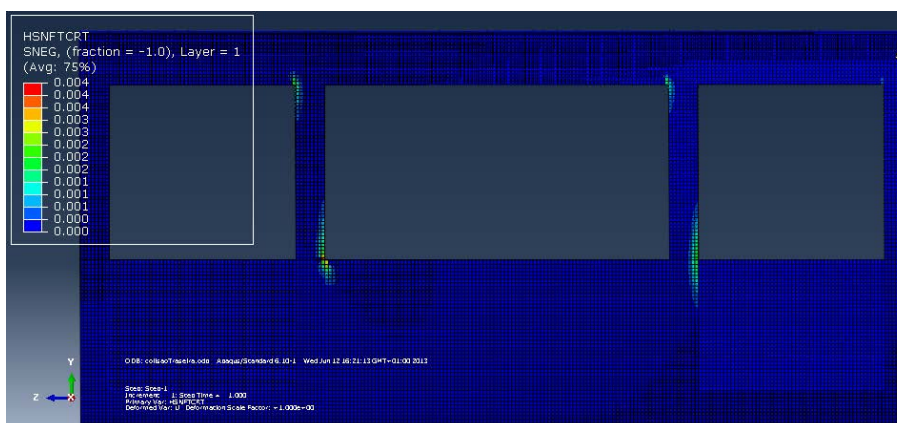


Figura 133 Vista da propagação do dano á tração da fibra da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira

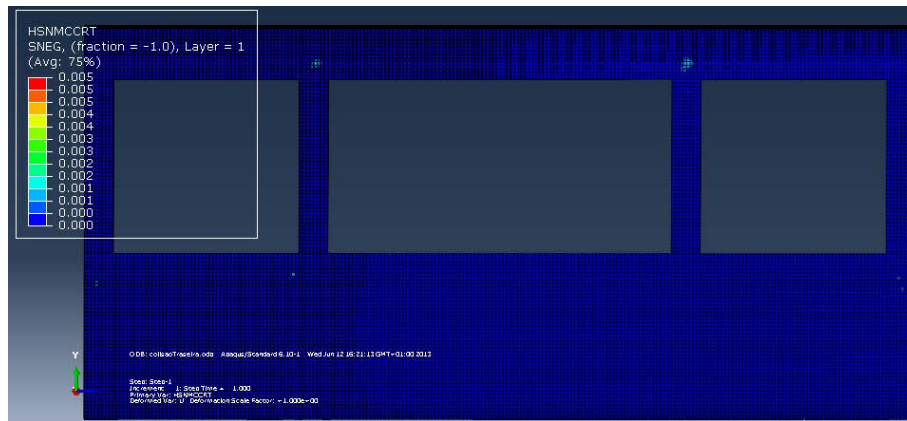


Figura 134 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira

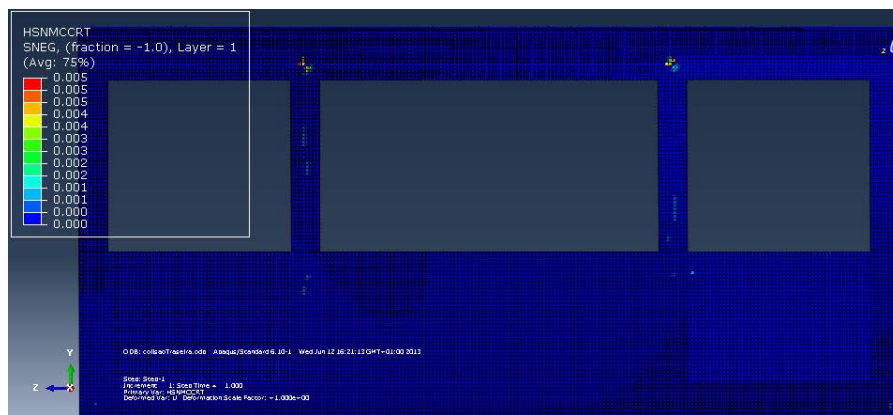


Figura 135 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira

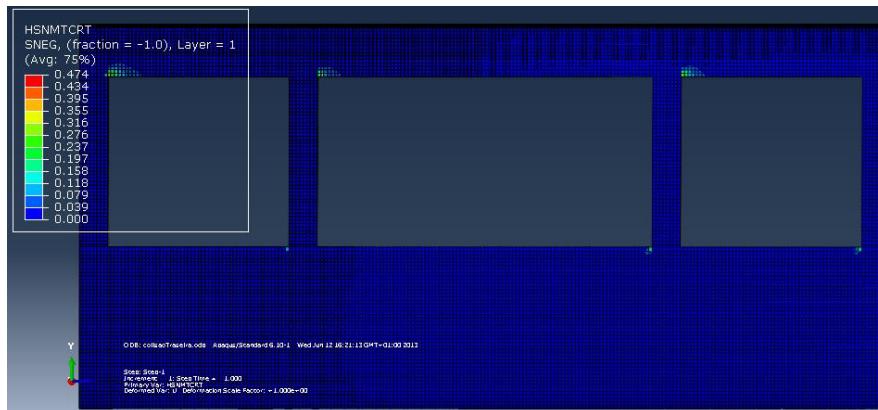


Figura 136 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral esquerda da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira

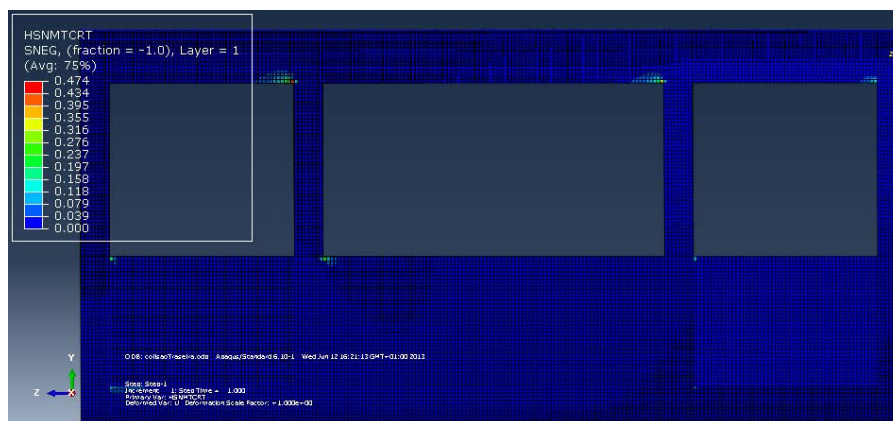


Figura 137 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central carroçaria quando sujeita ao ensaio de colisão traseira

Esta simulação conduz a resultados que genericamente são iguais aos resultados obtidos no ensaio de colisão frontal. Nesta situação as regiões aonde ocorrem as maiores deformações situam-se no teto da carroçaria, havendo genericamente sempre maiores deformações do lado direito da estrutura.

4.6. Análise da carroçaria sujeita a um ressalto e uma travagem

Um veículo deste género pode, em circunstâncias extraordinárias, realizar simultaneamente saltos e travagens, daí que exista interesse em analisar a carroçaria quando sujeita a esse tipo de ações e promover a resistência a esse nível. Nesta análise consideramos que a superfície inferior da carroçaria que se liga ao chassi se encontra encastrada e que toda a estrutura foi sujeita esforços verticais de 4g e longitudinais de 2g. Tal como nos restantes ensaios foram consideradas para efeitos de simulação 3 massas de 100 quilogramas colocadas 100 milímetros acima do teto do veículo.

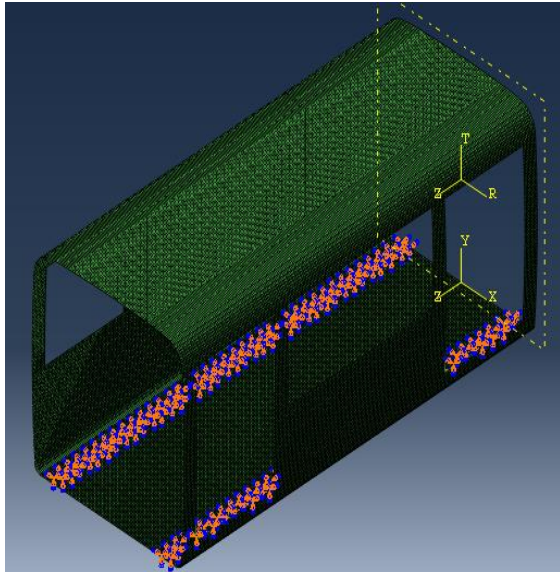


Figura 138 Representação dos apoios na secção central para a análise de um ressalto simultâneo com uma travagem

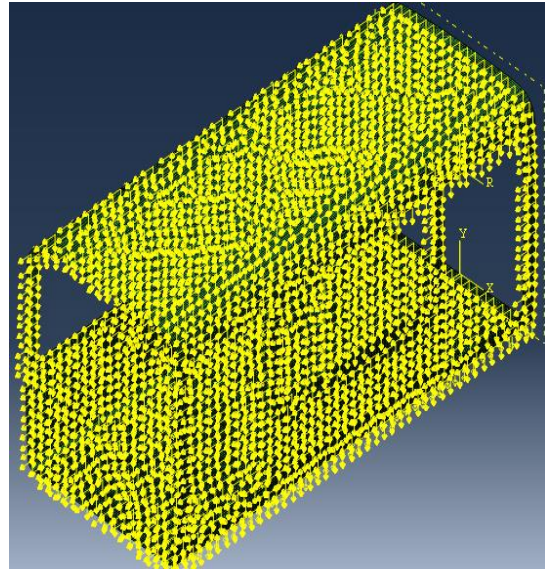


Figura 139 Representação cargas instaladas na secção central para a análise de um ressalto simultâneo com uma travagem

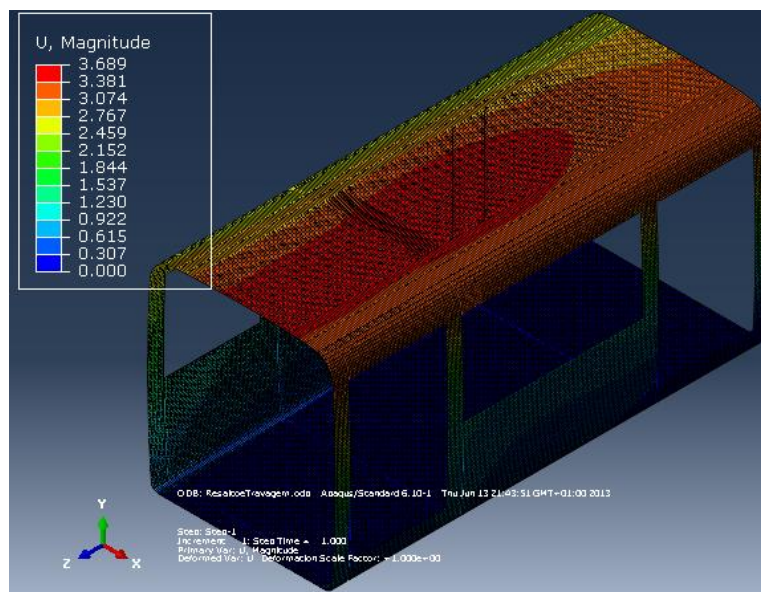


Figura 140 Vista tridimensional das deformações resultantes da simulação de esforço simultâneo de ressalto e travagem (fator de escala de 1x)

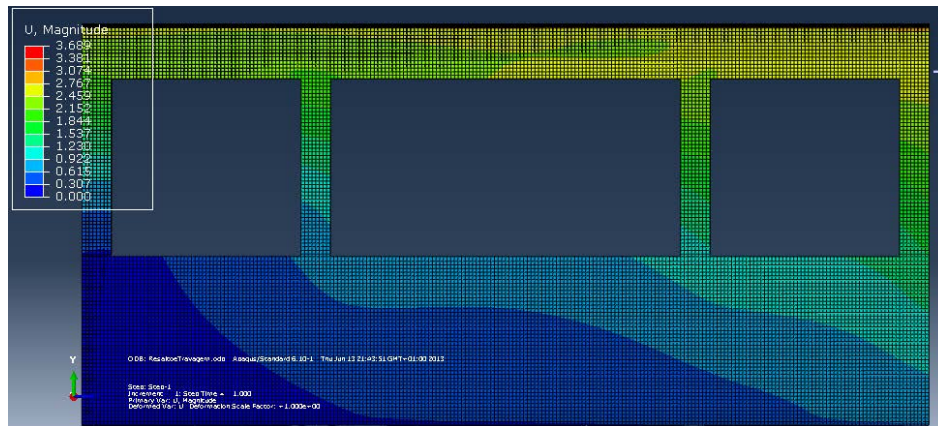


Figura 141 Vista lateral esquerda das deformações resultantes das solicitações combinadas de ressalto e travagem (fator de escala de 1x)

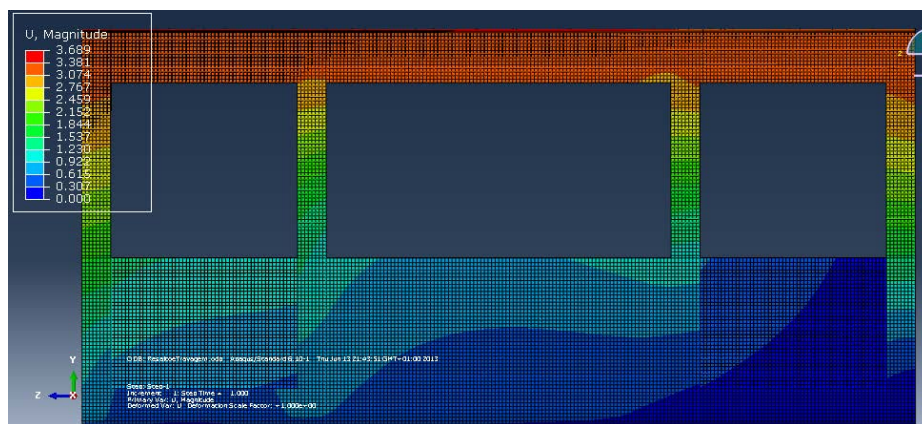


Figura 142 Vista lateral direita das deformações resultantes das solicitações combinadas de ressalto e travagem (fator de escala de 1x)

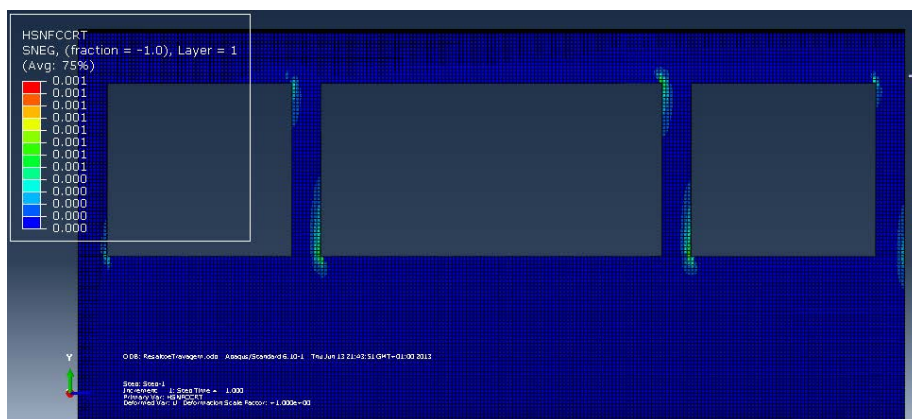


Figura 143 Vista da propagação do dano à compressão das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem

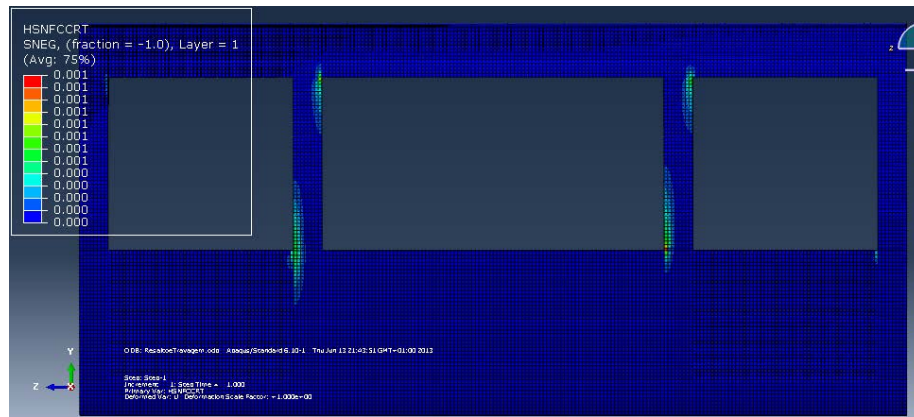


Figura 144 Vista da propagação do dano á compressão das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem

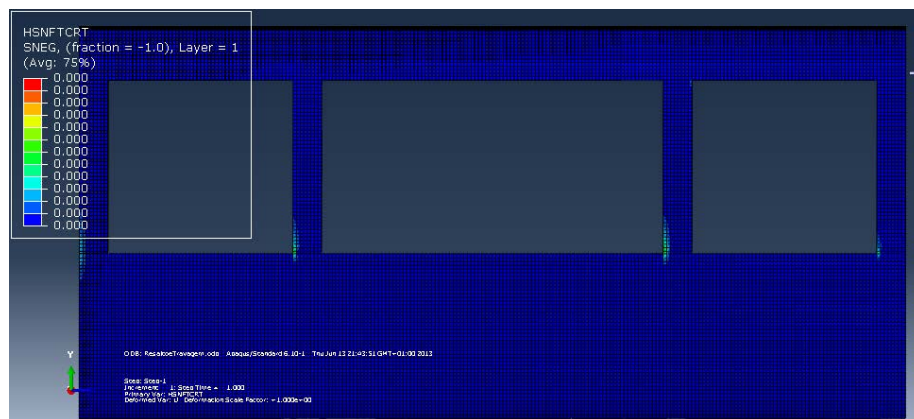


Figura 145 Vista da propagação do dano á tração das fibras da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem

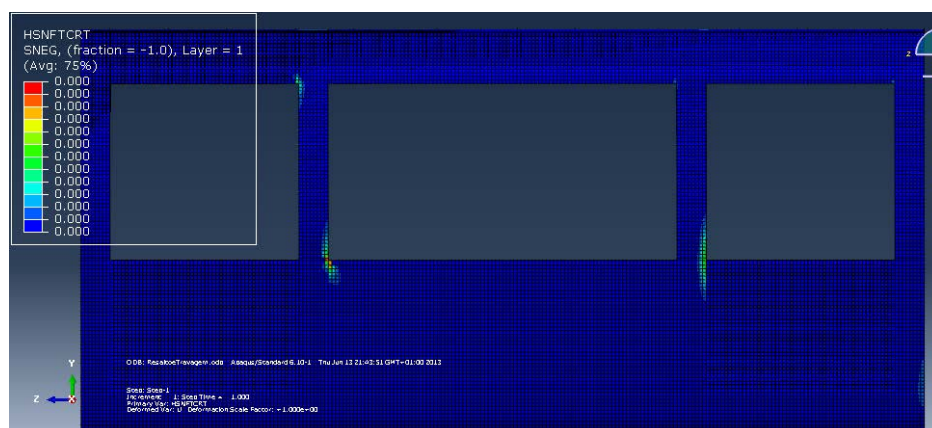


Figura 146 Vista da propagação do dano á tração das fibras da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem

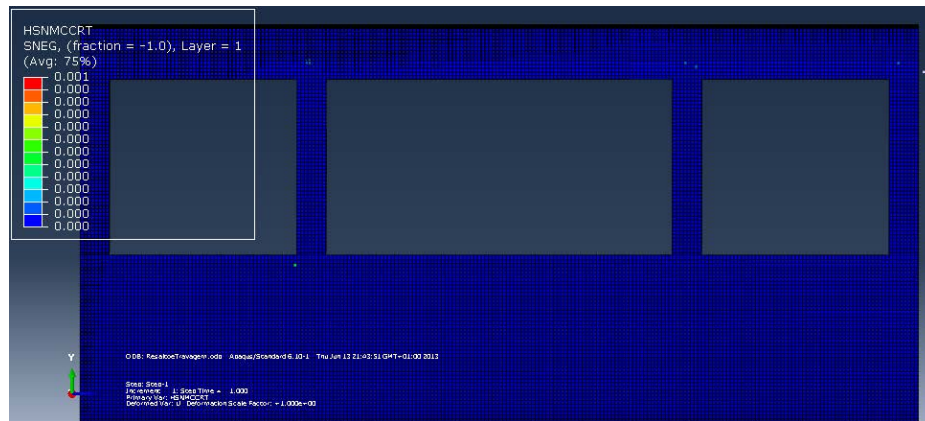


Figura 147 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem

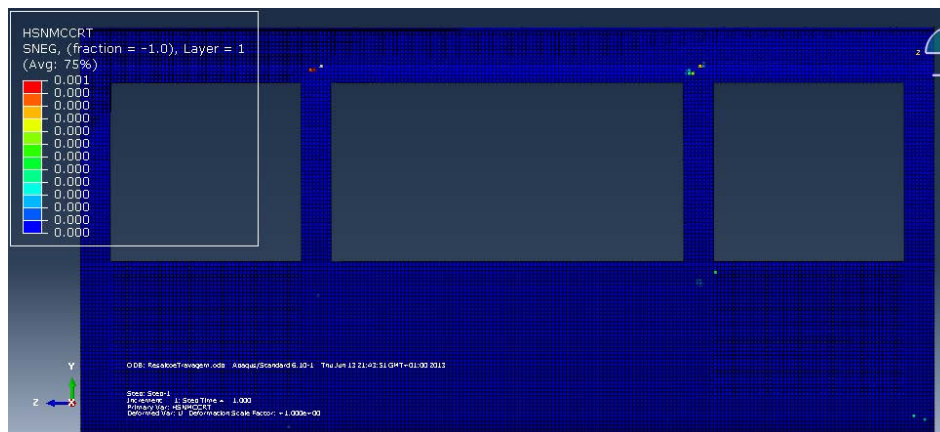


Figura 148 Vista da propagação do dano á compressão da matriz da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem

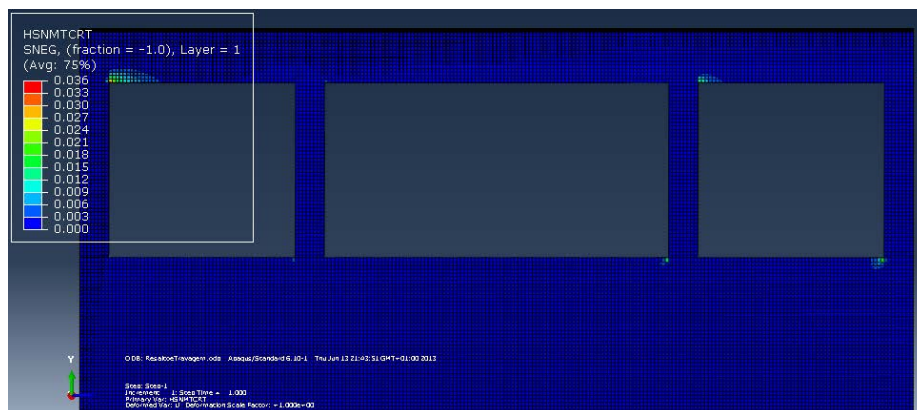


Figura 149 Vista da propagação do dano á tração da matiz da lateral esquerda da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem

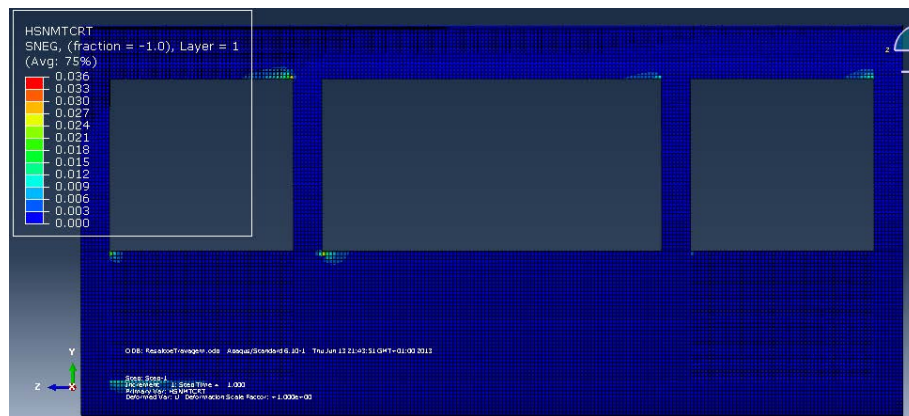


Figura 150 Vista da propagação do dano á tração da matriz da lateral direita da secção central da carroçaria quando sujeita aos esforços combinados de ressalto e travagem

Os resultados indicam que apesar de sujeitarmos a estrutura a uma carga vertical que é quatro vezes superior á utilizada nos ensaios anteriores não se verifica uma deformação excecional da região superior da estrutura modelada. Verificando-se até que os valores dessa mesma deformação são inferiores aos verificados no ensaio de capotamento. As zonas mais sacrificadas com este tipo de ocorrência situam-se no teto da viatura. Para os valores de solicitação impostos não se verifica o início da propagação do dano do material compósito em nenhuma das secções da estrutura.

4.7. Determinação da rigidez torsional

Para simular esta situação no ABAQUS, foi necessário utilizar três encastramentos, que impedem movimento nas três direções principais (x,y,z). Sobre o quarto ponto de ligação ao exterior aplicamos uma força de 1KN. Em função dos resultados obtidos no programa para o deslocamento do ponto em que foi aplicada a força unitária, determinamos a rigidez torsional da carroçaria.

A influência do peso dos vários componentes do veículo sobre o chassis é desprezada pelo facto de querermos obter a rigidez torsional.

O primeiro passo foi calcular a rotação sofrida pela extremidade onde foi aplicada a força através da seguinte expressão:

$$\theta = \arctg\left(\frac{dy}{b}\right) \quad (\text{eq.42})$$

Em que dy é o deslocamento dessa extremidade dado pelo programa e “b” é o braço da força aplicada. Em seguida, determinamos a rigidez torsional em KN/º, aplicando a expressão seguinte.

$$\text{Rigidez torsional} = \frac{\text{Momento}}{\theta} = \frac{1000 \times b}{\theta} \quad (\text{eq.43})$$

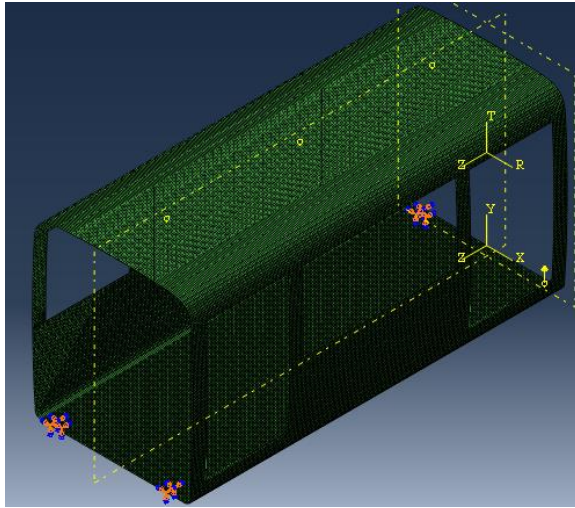


Figura 151 Representação dos apoios na secção central para a análise da rigidez torsional

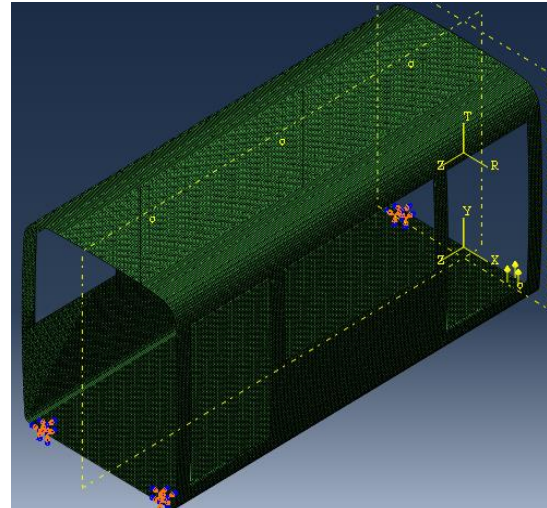


Figura 152 Representação cargas instaladas na secção central para a análise da rigidez torsional da estrutura

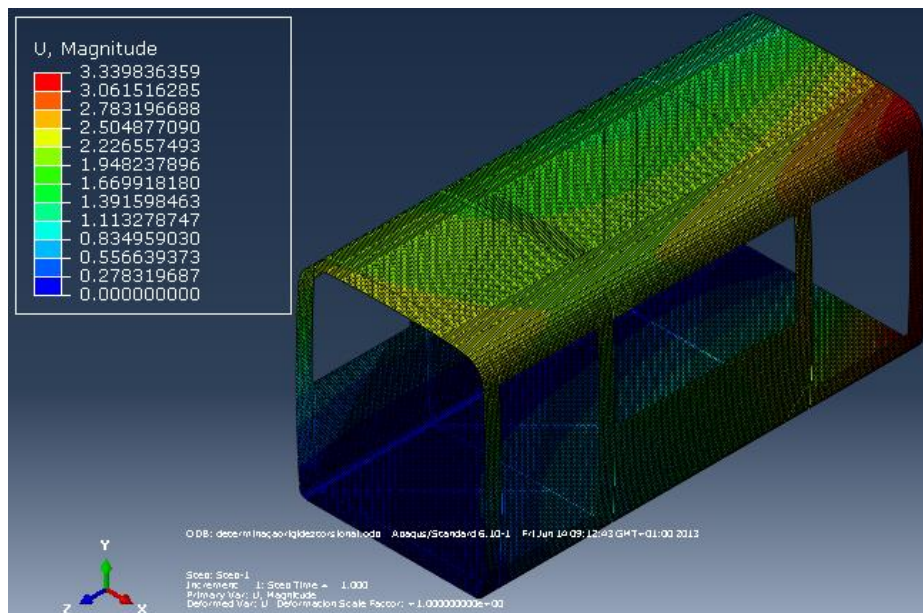


Figura 153 Representação gráfica das deformações ocorridas na estrutura no ensaio de rigidez torsional

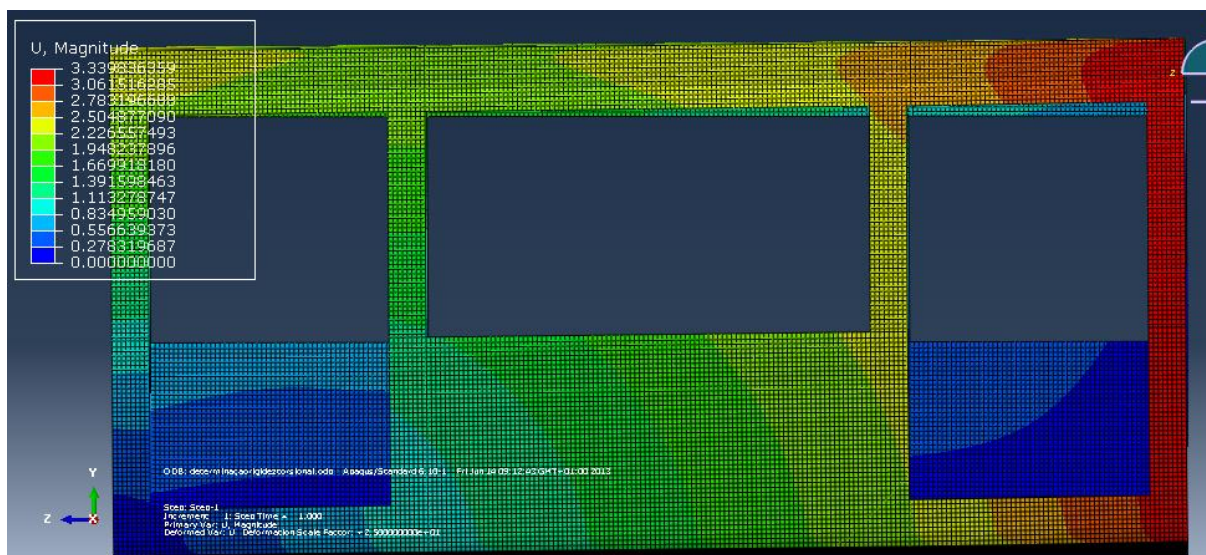


Figura 154 Vista da lateral direita da deformação causada pelo ensaio de rigidez torsional (fator de escala de 25X)

Após realizados os cálculos, chegamos a um valor de rigidez torsional da secção central do autocarro de 21694,41 kN/°, sendo este valor substancialmente superior ao verificado para as estruturas tradicionais.

4.8. Solução Final Otimizada

A solução final resulta da otimização das soluções sujeitas aos ensaios de simulação. Após o fim dos ensaios e analisados os resultados obtidos, foram identificadas as principais debilidades da carroçaria inicialmente proposta. Feita a minimização dos problemas encontrados chegamos a uma solução final em que o corpo da carroçaria apresenta uma espessura de 50 milímetros assumindo a sequência de empilhamento vista anteriormente com o nome de Corpo do Autocarro Versão 2, à qual para aumentar a resistência estrutural da carroçaria foram adicionados 4 pilares (2 apresentam um largura de 210 milímetros e os outros 2 apresentam 198mm de diâmetro), o que eleva a espessura do autocarro nessas zonas para 100 milímetros com a sequência de empilhamento de nome Pilares Versão 3.

O modelo de carroçaria final proposta, de acordo com os dados retirados dos programas de simulação, terá uma massa de 1482,175 quilogramas. A esta massa deve ainda ser adicionada a massa das janelas e faróis elevando o peso da estrutura para 1805,583 se for utilizado Perspex (TM) GS Acrylic Cast Sheet, material com uso generalizado na indústria da competição automóvel, ou para 2150,081 quilogramas se for utilizada a solução tradicional em vidro. Devido ao carácter inovador do projeto achamos que fará mais sentido optar pela solução em Perspex(TM) o que permitirá uma redução do peso final da carroçaria em vazio (sem equipamentos de nenhum tipo instalados) de 25.89%.

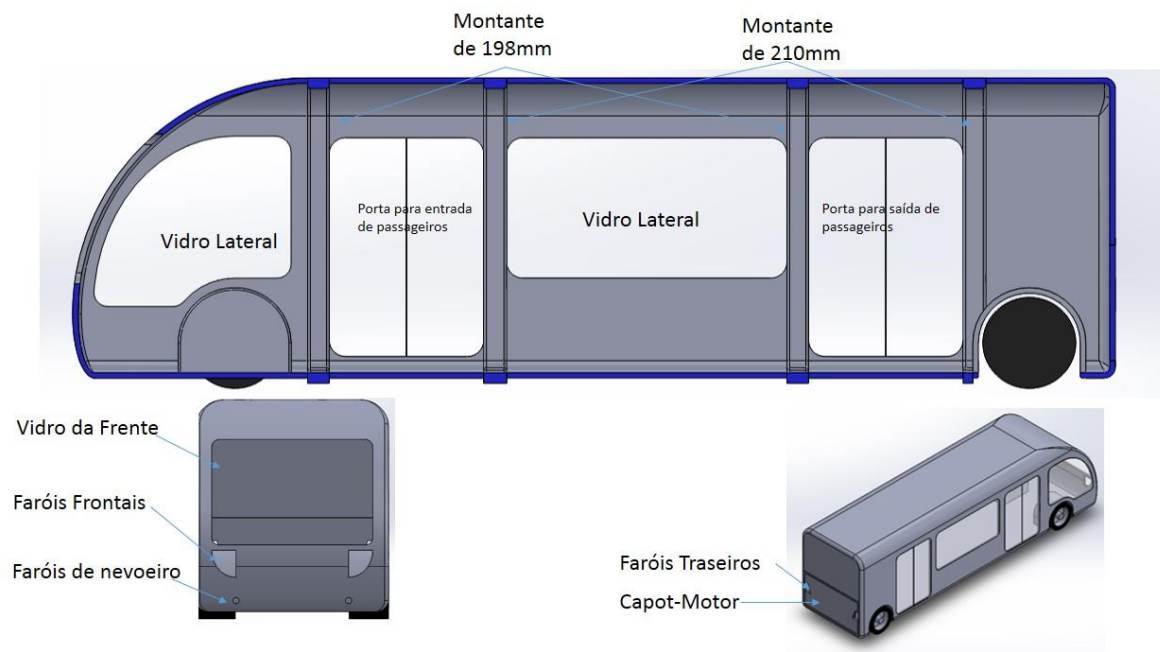


Figura 155 Vista geral da solução final adotada

5. Estudo e Produção de Moldes

Concluído o estudo a nível estrutural, demos início ao trabalho prático propriamente dito estudando a produção de moldes que tornarão possível a produção de um protótipo que permitirá aferir a viabilidade do processo de fabrico que nos encontramos a estudar.

5.1. Solução Proposta

A solução proposta encontra-se representada na próxima figura. Devido às limitações da máquina de enrolamento o mandril é realizado á escala de 1:10 das dimensões reais do veículo a produzir.

Como pode ser constatado pela análise da figura o mandril projetado será realizado em madeira MDF sendo posteriormente recoberto com papel autocolante. Optamos por utilizar MDF porque apresenta um baixo custo apresentando-se como a melhor solução entre as soluções estudadas. Este mandril permite a obtenção, da secção central da carroçaria do autocarro e dos seus pilares numa única operação de enrolamento. Assim sendo, para obtermos a carroçaria completa, tornando possível a sua montagem sobre o chassis, apenas falta encontrar uma solução que permita obter as cavas das rodas, a secção frontal e a traseira do autocarro. Abdicando de realizar estes elementos por enrolamento filamental, pois tal á priori não se apresenta viável, era necessário conceber moldes que tornassem possível a sua obtenção por SCRIMP, como o nosso trabalho pretende apenas comprovar a viabilidade técnica da realização de uma carroçaria de autocarro por enrolamento filamental e SCRIMP acabamos por não desenvolver esses mesmos moldes. Para tornar possível que a zona das janelas não seja impregnada, ou seja que se mantenha seca, dotamos este molde de elementos com a forma das janelas realizados em aço e recobertos com silicone nos seus limites. Estes elementos serão aparafusados á estrutura do mandril tornando possível a realização da técnica de Pinch-off.

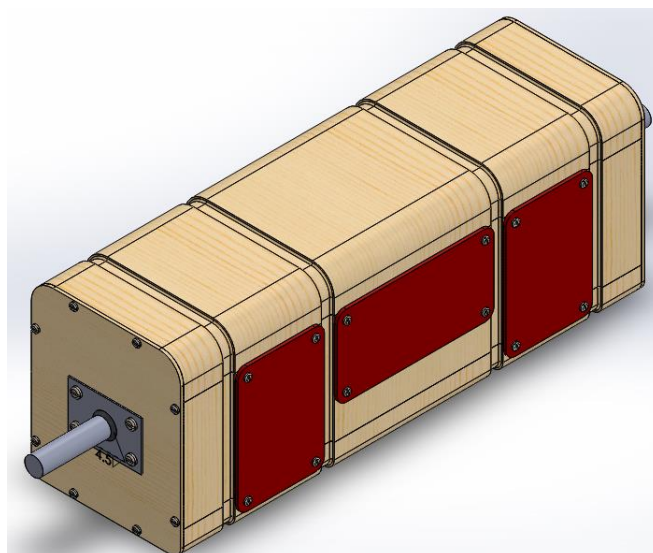


Figura 156 Representação em vista isométrica do mandril

Este mandril foi estudado para tornar possível a sua fácil remoção após finalizado o processo de cura do compósito. A extração do mandril do interior da estrutura em material compósito será um momento crítico do processo de produção, uma vez que apesar de ser bastante fácil só permite a obtenção carroçaria sem danos se for realizada de forma correta. Sendo necessário para tal seguir a sequência de desmontagem proposta seguidamente:

1. Primeiramente é necessário desapertar os parafusos que unem os elementos responsáveis pela realização do processo de Pinch-off (representados a vermelho) ao resto da estrutura do mandril. Com a saída destes elementos ficamos com uma área livre que vai permitir a remoção do mandril;

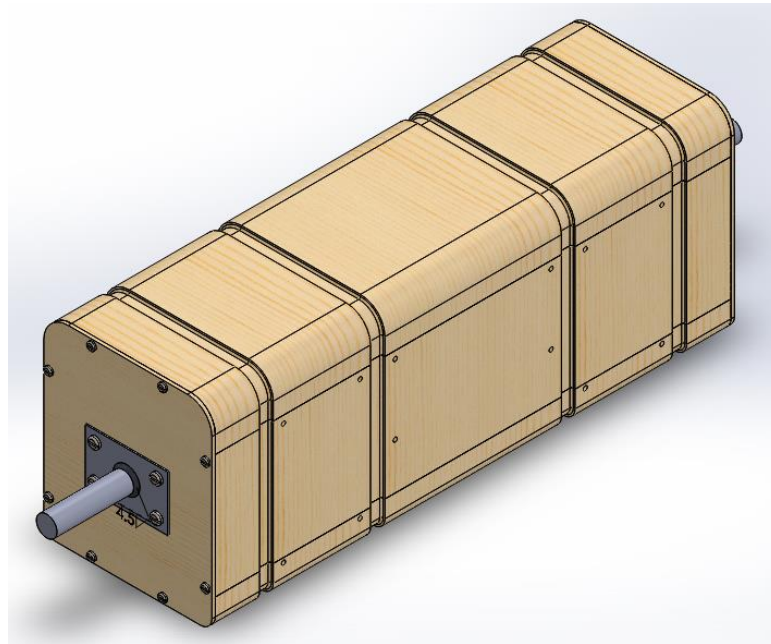


Figura 157 Mandril após a conclusão da primeira fase de desmontagem do mandril

2. Seguidamente retiram-se os topos do mandril desapertando os respetivos parafusos;

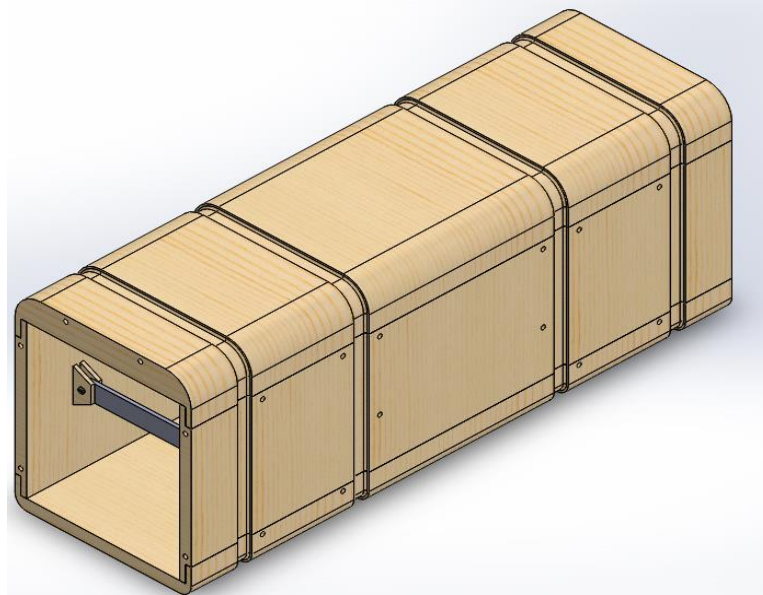


Figura 158 Mandril após a conclusão da segunda fase de desmontagem do mandril

3. Em seguida retiram-se todos os parafusos do sistema de barras horizontais do mandril, retirando-se em seguida essas mesmas barras;

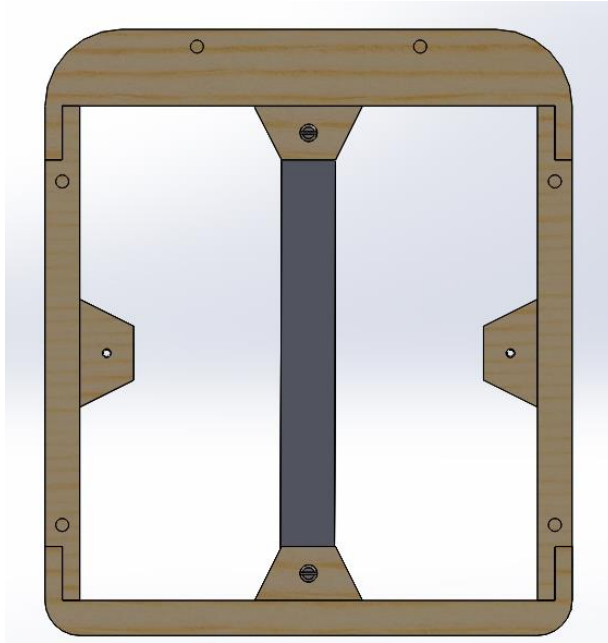


Figura 159 Vista frontal do mandril após a conclusão da 3ª etapa de desmontagem

4. Retira-se em seguida o painel lateral esquerdo e o painel lateral direito;

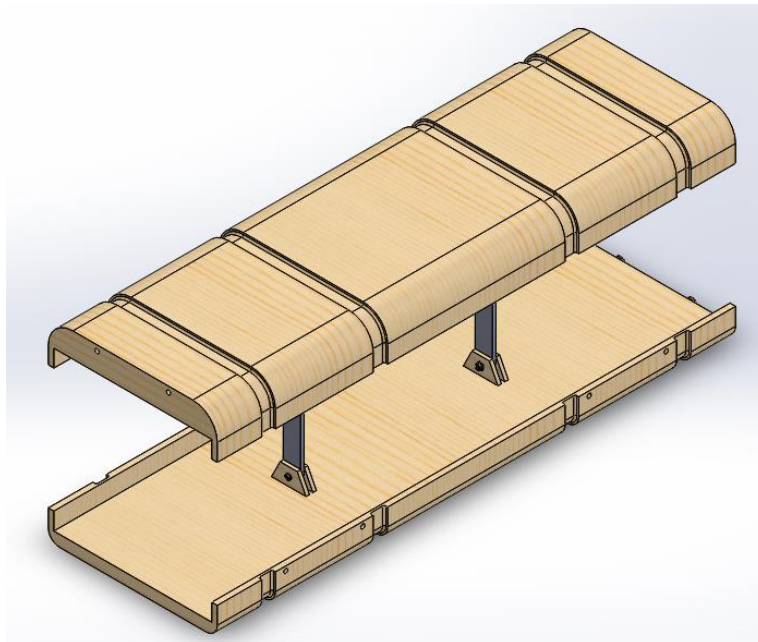


Figura 160 Vista em corte do mandril após a conclusão da 4ª etapa de desmontagem

5. A quinta etapa de desmontagem consiste em desaparafusar os elementos de ligação entre os painéis superior e inferior e as barras, retirando em seguida essas mesmas barras;

6. Após todas as etapas anteriores estarem concluídas retiram-se o painel superior e o painel inferior do mandril estando assim concluído o processo de desmontagem do mesmo.

A sequência de montagem do mandril é similar ao procedimento de desmontagem, e como é menos crítica para o processo produtivo e seria fastidioso não se encontra descrita neste trabalho.

Para garantir a ligação dos diversos elementos do mandril optamos por desenvolver um sistema de barras amovíveis, como pode ser visualizado na figura:

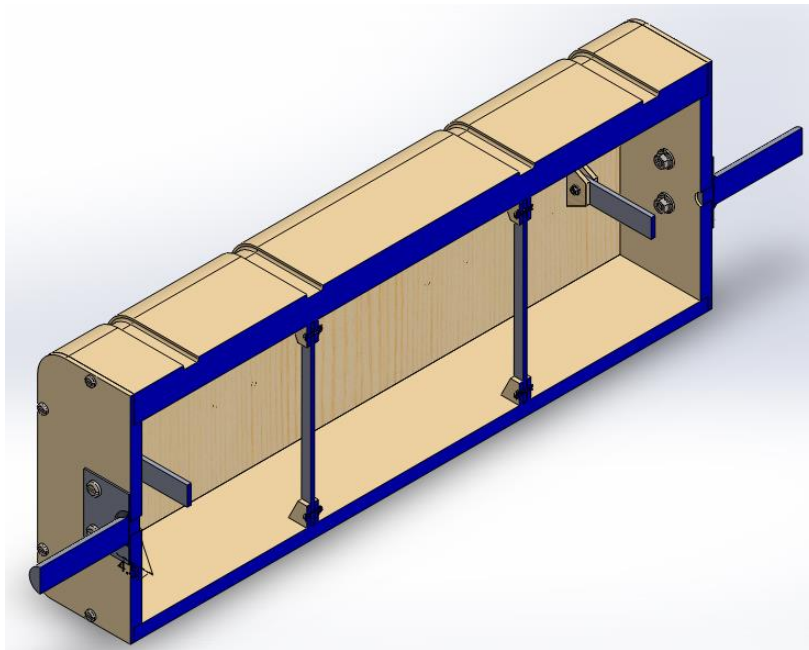


Figura 161 Representação em Corte do mandril

Este sistema é composto por barras de formas simples construídas em aço com 5 milímetros de espessura que são ligadas aos elementos do mandril por parafusos aumentando a rigidez do mesmo e impedindo o seu colapso durante o processo de SCRIMP.

Os restantes desenhos técnicos do mandril encontram-se apresentados no apêndice A.

5.2. Solução Utilizada

5.2.1. Mandril utilizado para testar a viabilidade do processo de enrolamento a seco seguido de SCRIMP na secção central do Autocarro

Por razões orçamentais, de tempo e de interesse para o projeto, o mandril anteriormente descrito não foi produzido. Para continuarmos a desenvolver o trabalho recorremos a um outro mandril já existente e que já havia sido utilizado em projetos similares.

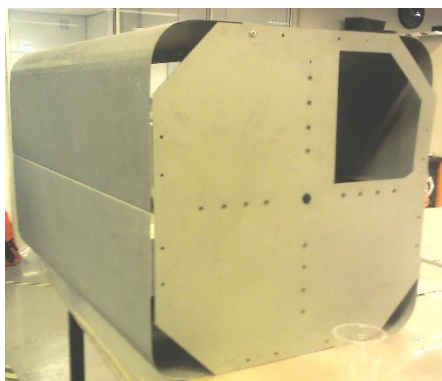


Figura 162 Mandril utilizado á chegada ao INEGI

O mandril é assim, um modelo realizado sem uma escala rígida, servindo para simular o enrolamento da secção central do autocarro, sendo realizado em chapa zincada de 1 milímetro de espessura. Este mandril encontrava-se depositado nas antigas instalações do INEGI, como tal, as suas condições de conservação não eram as melhores, apresentando-se já sem algumas peças que foi necessário mandar produzir para o tornar de novo operacional. Relativamente às suas dimensões, este mandril apresenta 495 milímetros de largura, 505 milímetros de altura tendo 900 milímetros de comprimento, sendo que destes só cerca de 750 milímetros serão úteis para o enrolamento da estrutura.

Este mandril ao contrário do que inicialmente tínhamos idealizado não permite a obtenção numa única operação de enrolamento, do corpo do autocarro e dos seus pilares. Outro dos problemas que este mandril evidenciava era a falta de rigidez. Para tentar resolver este problema foram estudadas duas soluções, uma em MDF e a outra em aço, que podem ser vistas nas próximas figuras.

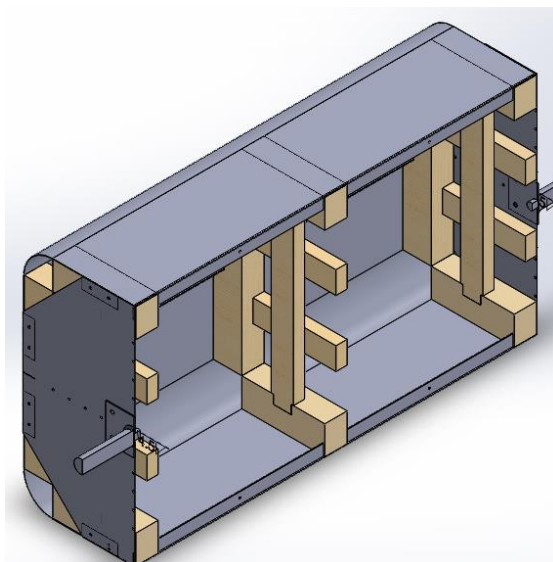


Figura 163 representação em corte da solução em MDF

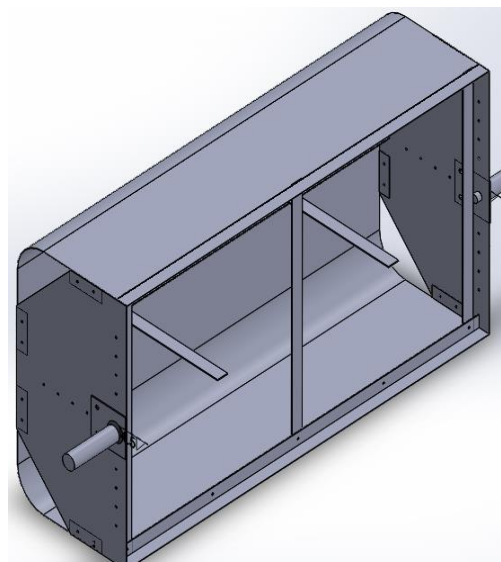


Figura 164 Representação em corte da solução em aço

Após a análise das vantagens e desvantagens de cada uma das soluções propostas a decisão pendeu para a solução em aço, pois era a solução mais simples e mais fácil de ser executada no curto espaço de tempo disponível.

A solução em aço passa pela inclusão no interior do mandril de 5 barras com 5 milímetros de espessura (duas segundo uma direção e três segundo a outra) de forma a aumentar a rigidez do conjunto, viabilizando assim a utilização deste mandril para o processo de SCRIMP. A ligação entre as barras criadas e o mandril já existente é feita utilizando os furos já existentes no mandril, usando para o efeito parafusos M4. Para aumentar a rigidez da estrutura foi ainda necessário substituir as extremidades do mandril existentes uma vez que estas apenas tinham um milímetro de espessura, apresentavam uma rigidez muito baixa o que impedia a colocação dos elementos de acoplamento entre a máquina de enrolamento filamental e o mandril.

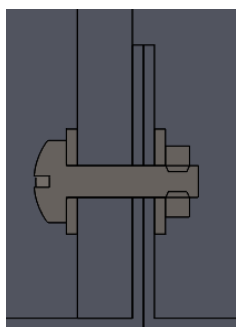


Figura 165 Representação em corte do acoplamento entre as barras e o mandril existente

5.2.2. Molde utilizado para testar a eficiência do processo de Pinch-off

Verificando-se que o mandril utilizado para o estudo da viabilidade do processo de enrolamento seco e infusão não dispunha de rigidez suficiente para tornar possível a realização do Pinch-off desenvolvemos um molde para testar esta técnica de forma isolada.

A solução criada foi realizada á escala de 1 para 10 da escala real da carroçaria do autocarro e pretende testar a possibilidade de manter seca a fibra na região da janela do autocarro. É constituída por duas chapas de aço em que uma delas é representativa da secção lateral do autocarro e a outra representa a janela central do mesmo. Estas chapas apresentam respetivamente espessuras de 3 e de 10 milímetros. Para garantirmos que a zona da janela não será impregnada durante o processo de infusão é necessário comprimir ao máximo as fibras nessa região. Sabendo isso, precisamos que as duas chapas de aço sejam apertadas uma contra a outra deixando a fibra no meio. Para que tal seja possível fizemos 6 furos de 6 milímetros de diâmetro na chapa representativa da secção da carroçaria, roscando a chapa representativa da zona da janela central.

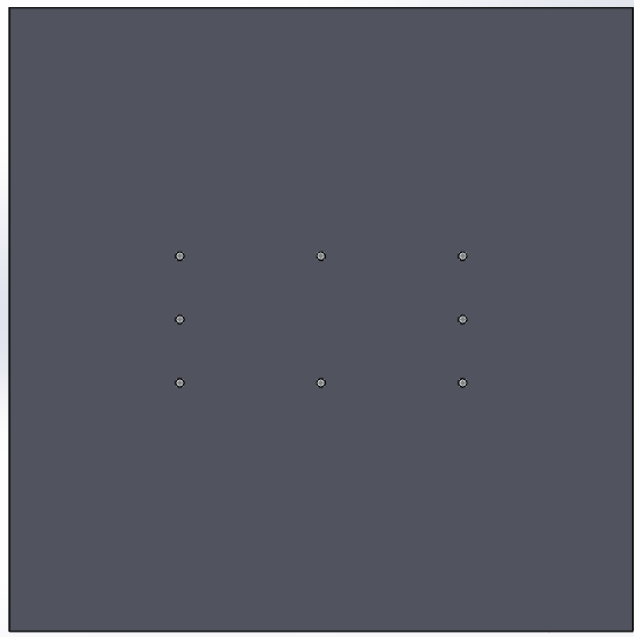


Figura 166 Chapa representativa da forma da secção do autocarro

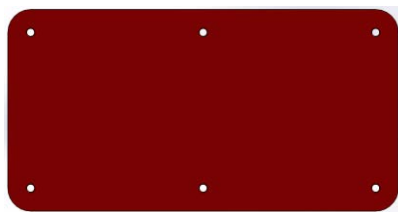


Figura 167 Chapa representativa da forma da janela central do autocarro

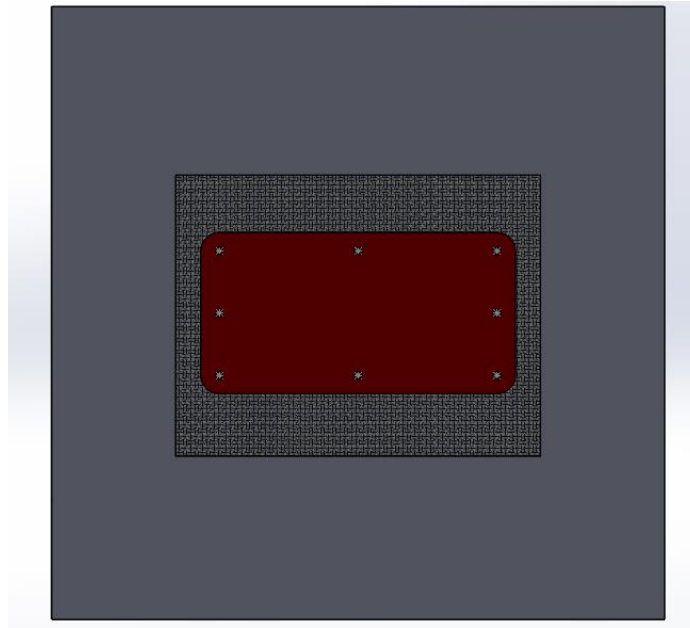


Figura 168 Molde para a realização de Pinch-off da janela central do autocarro

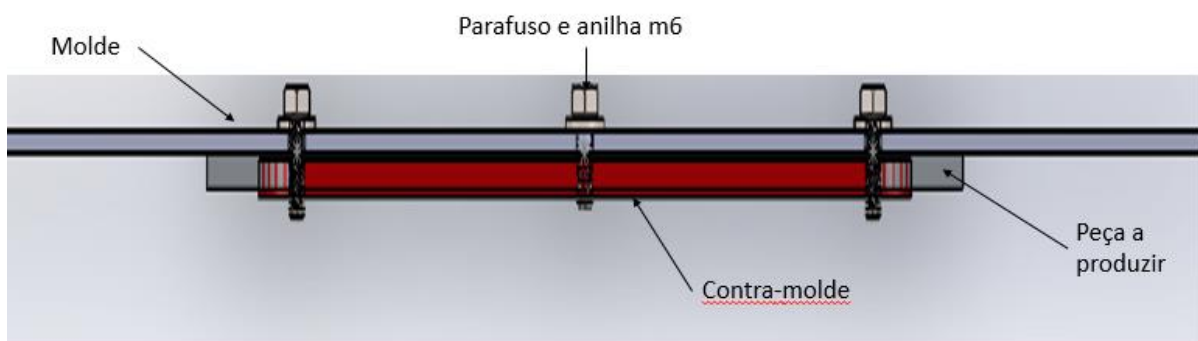


Figura 169 Representação em corte do funcionamento do sistema de Picth off proposto

6. Avaliação da viabilidade técnica do projeto

Para testarmos a viabilidade técnica da realização da secção central do autocarro por enrolamento filamentar a seco seguido de uma técnica de SCRIMP foi necessária a realização de protótipos. Devidas as características peculiares do mandril utilizado não é possível realizar os dois processos de forma simultânea, como tal, testaremos separadamente a viabilidade do processo de enrolamento filamentar a seco seguido de SCRIMP e o processo de impregnação seletiva das fibras. Para testarmos a viabilidade das técnicas de impregnação seletiva usaremos um molde representativo da região lateral do autocarro e substituiremos o laminado resultante do enrolamento filamentar por um laminado formado por tecidos bidirecionais.

6.1. Produção de um protótipo da secção central do autocarro

Para conseguirmos realizar um protótipo representativo da secção central do autocarro foi necessário realizar uma série longa de procedimentos que procuramos descrever em seguida:

- Iniciamos o processo de produção do protótipo com a colocação do mandril na bucha da máquina de enrolamento, simultaneamente encostamos o ponto da mesma máquina na outra extremidade do mandril;



Figura 170 Mandril montado na bucha da máquina de enrolamento

- Antes de iniciarmos o processo de produção propriamente dito foi necessário realizar a programação da máquina de enrolamento filamentar, para tal recorremos á ajuda do engenheiro Hugo Faria;
- Após a programação da máquina foi necessário proceder a várias experiencias de enrolamento de forma a testar o correto desenvolvimento do programa;



Figura 171 Enrolamento de teste para verificar o correto desenvolvimento do programa

- Em seguida cortamos e removemos as fibras resultantes das experiências realizadas;
- Para garantirmos a limpeza superficial, o mandril foi limpo com acetona, delimitando com fita a zona útil do mandril onde ocorrerá o enrolamento;
- Por fim para obter uma desmoldagem eficaz realizamos uma passagem com o desmoldante Regular Mirror Glaze 87 High Temp Mold Release Wax®;



Figura 172 Preparação do mandril com desmoldante

- Sobre a camada de desmoldante colocamos um filme de Melinex®;



Figura 173 Aplicação de Melinex® sobre o mandril

- Após finalizados todos estes processos, iniciamos o processo de enrolamento. Para tal, começamos por colocar fita-cola para segurar a ponta de roving ao mandril. Realizamos esta operação para garantir que as fibras ficassem sobre tensão;

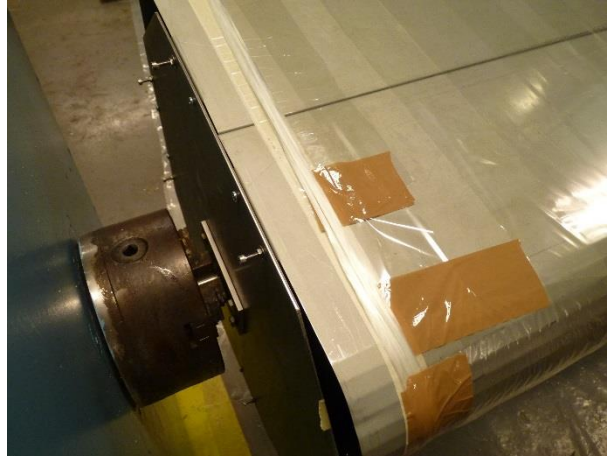


Figura 174 Início do processo de enrolamento (colagem da ponta de roving ao mandril)

- Concluídos os 100 ciclos programados está concluído o enrolamento helicoidal da primeira camada de fibra de vidro Owens Corning 2400 TEX305E(ficha técnica da fibra encontra-se apresentada no apêndice B do trabalho), disposta tal como o estabelecido no processo de simulação a $\pm 20/-20$ graus com o eixo vertical;



Figura 175 Início do processo de enrolamento



Figura 176 Aspecto do enrolamento decorridos metade dos ciclos programados

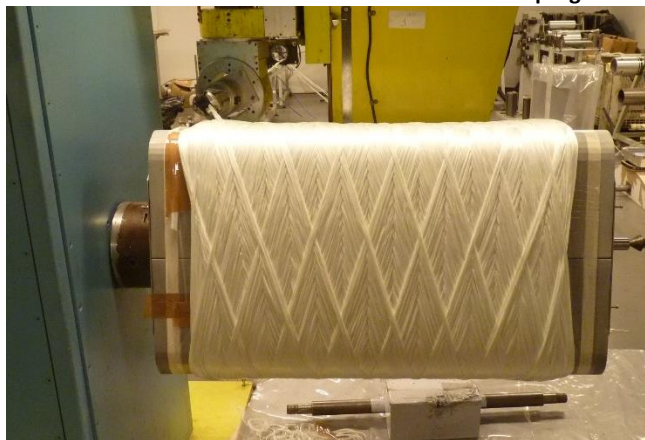


Figura 177 Aspecto final do enrolamento decorridos todos os ciclos programados

- Em seguida foi iniciado o processo de enrolamento da segunda camada constituinte da pele inferior da sanduiche;
- Finalizado o enrolamento da segunda camada procedemos a um enrolamento circunferencial na extremidade esquerda da zona útil do mandril de forma a impedir que as fibras perdessem a tensão com que tinham sido enroladas. Procede-se em seguida ao corte e colagem das fibras na extremidade do mandril;
- Por limitações de disponibilidade da máquina de enrolamento foi necessário retirar o mandril da máquina;
- Antes de podermos iniciar o processo de SCRIMP verificou-se que apesar de previamente vedado o mandril não se encontrava estanque. Como tal foi necessário realizar a sua selagem. Para a realização dessa operação foi necessário retirar os topos do mandril e colocar fita selante nas uniões entre os diversos elementos que formam o mandril. Durante este processo ocorreu um deslizamento das fibras que arruinou todo o processo realizado, obrigando ao reinício do processo;



Figura 178 Isolamento interno do mandril



Figura 179 Aspecto final do mandril após o incidente

- Devido ao incidente ocorrido tivemos então de cortar e remover as fibras;

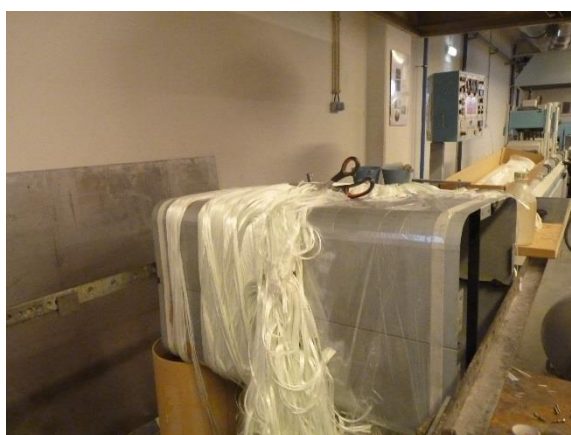


Figura 180 Corte e retirada das fibras após incidente

- Seguidamente colocamos nas uniões dos elementos do mandril fita desmoldante e aplicamos ao resto do mesmo 5 camadas do desmoldante anteriormente usado procedendo-se ao polimento de cada camada passados 30 minutos da sua aplicação;



Figura 181 Aspecto final de uma das faces do mandril após a colocação de fita desmoldante e aplicação das 5 camadas de desmoldante

- Enquanto aguardávamos a disponibilidade da máquina de enrolamento preparamos o núcleo da sanduiche. Para tal procedemos ao corte da espuma de poliuretano. Usamos esta espuma pois não seria possível ter disponível, em tempo útil, a espuma de PVC usada no processo de simulação. A utilização de espuma de poliuretano de 40 kg/m^3 não altera os fundamentos técnicos, ou seja permite-nos aferir da mesma maneira a viabilidade do processo. Iniciamos o processo de preparação dos núcleos por cortar as placas de $1000*1000*10 \text{ mm}^3$ á medida de $780*1000*10\text{mm}^3$;
- Após termos concluído o corte das espumas e para aumentar a sua permeabilidade e garantir que ambas as peles da sanduiche eram impregnadas procedemos a perfuração dos núcleos;

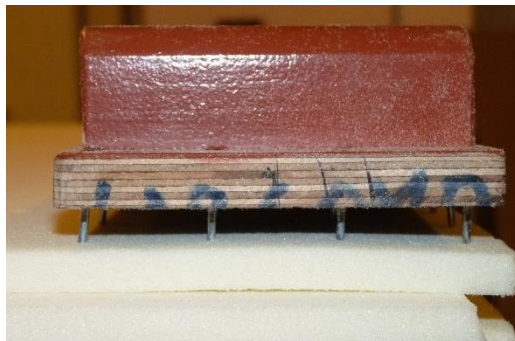


Figura 182 Ferramenta utilizada na perfuração dos núcleos



Figura 183 Núcleos após o processo de perfuração

- Finalizados todos estes processos voltamos a montar o mandril na máquina de enrolamento, dando-se início ao processo de enrolamento do protótipo;
- Com a utilização de 5 camadas de desmoldante verificou-se que havia um excessivo escorregamento específico das fibras sobre o mandril, como tal tivemos de voltar a colocar um película de Melinex® sobre o mandril;
- Ao fim de 56 ciclos estava concluída a pele inferior da sanduiche;



Figura 184 Aspecto final terminado o enrolamento da pele inferior da sanduiche

- Utilizando a cola em *spray* Airtec® 2 colamos o núcleo á fibra. Durante o processo de colagem num dos cantos do protótipo ocorreu a rotura do núcleo;



Figura 185 Conformação do núcleo ao mandril



Figura 186 Núcleo que sofreu rotura durante o processo de colagem á pele inferior

- Após finalizada a colagem procedeu-se ao enrolamento da pele exterior da sanduiche;

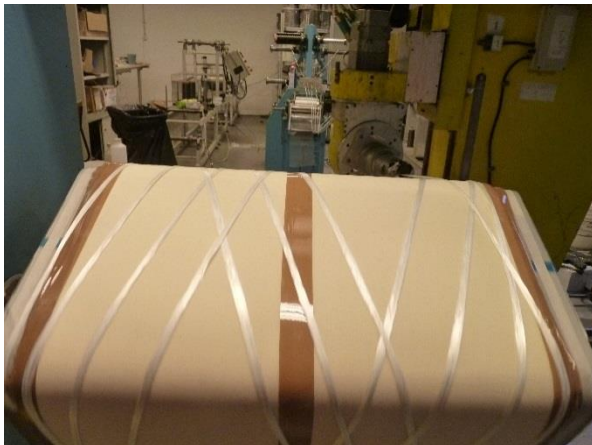


Figura 187 Início do processo de enrolamento da pele superior da sanduiche

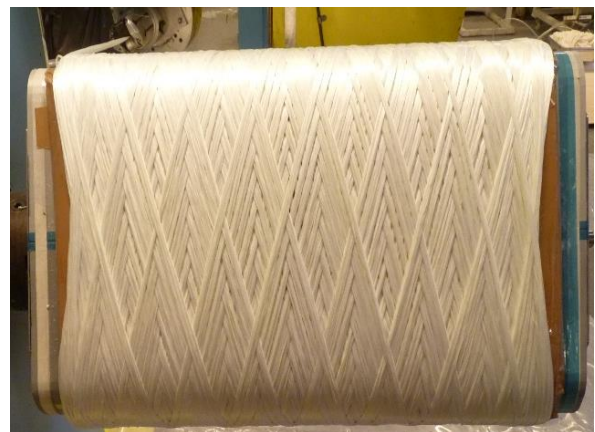


Figura 188 Aspecto final da estrutura após finalizado o enrolamento a seco

- Em seguida retirou-se o protótipo da máquina de enrolamento e colocou-se o mesmo num suporte;

- Posteriormente iniciou-se o processo de preparação para a infusão, para tal cortamos uma porção de “peel ply” e colamos a mesma á pele superior do laminado com Airtec® 2;



Figura 189 Deposição de “peel ply” sobre a estrutura enrolada

- Com a ajuda do técnico do laboratório de compósitos do INEGI colocamos duas espirais de abastecimento e recolha de resina. Para conseguirmos colar as espirais ao “peel ply” usamos fita selante;

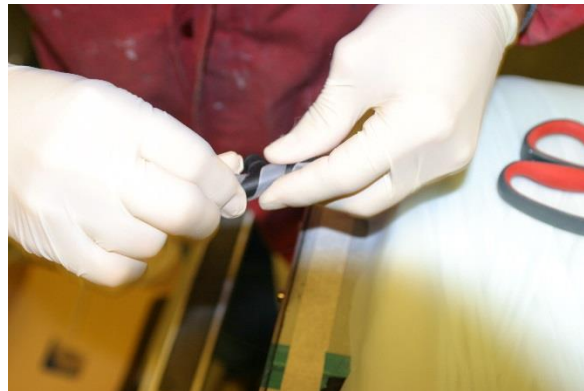


Figura 190 Instalação das espirais

- Posteriormente colocamos um filme perfurado e uma rede de homogeneização sobre a estrutura. Sensivelmente a meio do mandril cortamos o filme perfurado de forma a criar uma zona de travão ao escoamento de resina. Esta zona serve essencialmente para garantir a homogeneização do escoamento da resina;



Figura 191 Deposição do filme perfurado e da rede de homogeneização com a abertura de canal

- Terminada a operação anterior colocamos uma espiral que terá duas funções. Inicialmente vai ser responsável pelo vácuo do sistema quando se estiver a fazer a impregnação da metade inferior do mandril, posteriormente servirá para realizar o abastecimento de resina para a impregnação da segunda metade do mandril;



Figura 192 Instalação de uma espiral intermédia para melhor impregnação da sanduiche

- Por fim fechamos o saco de vácuo colando o saco á zona livre do mandril com fita selante. Verificando-se que existiam pequenas fugas que era necessário tapar, usamos esse mesmo material para efetuar essa reparação;



Figura 193 Colocação do saco de vácuo

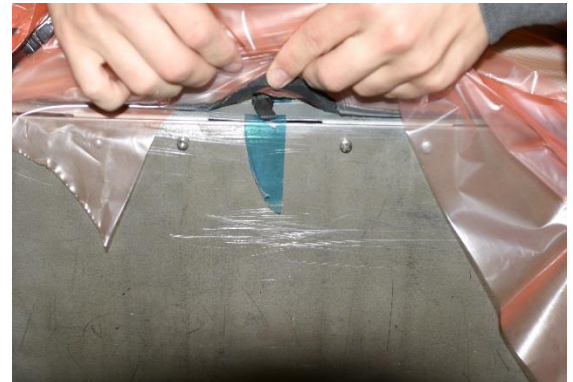


Figura 194 Tentativa de tapar as pequenas fugas de ar existentes com fita selante

- Após termos verificado que a estrutura se encontrava corretamente vedada instalamos as diversas tubagens de abastecimento e recolha de resina;



Figura 195 instalação das mangueiras de abastecimento e recolha de resina

- Tendo concluído este processo fomos preparar a resina. Para tal e na impossibilidade de usar resina de poliéster apropriada ao processo de infusão, utilizamos uma resina de epóxico de referência CR80 que é necessário misturar com o endurecedor Biresine CH80-1 (ficha técnica da resina pode ser encontrada no apêndice B deste trabalho);
- Tendo a resina pronta e aproveitando ao máximo o seu tempo de cura iniciamos o processo de impregnação ao alto da sanduiche, primeiro na metade inferior do mandril e posteriormente no resto da estrutura. Este processo demorou cerca de 70 minutos;



Figura 196 Início do processo de impregnação da estrutura enrolada



Figura 197 Metade inferior do mandril totalmente impregnada de resina



Figura 198 Fase inicial da impregnação da metade superior do mandril

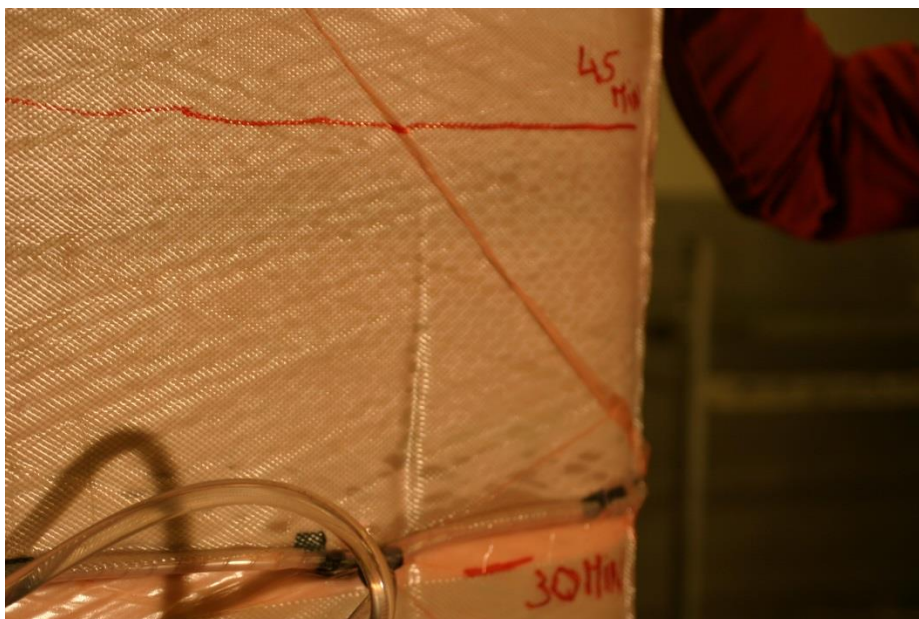


Figura 199 Aspeto da pele superior da sanduiche passados 45 minutos do início da infusão



Figura 200 Aspeto da estrutura após terminado o processo de infusão

- 24 Horas após o fim do processo de impregnação foi desligado o sistema de vácuo sendo retiradas as mangueiras de abastecimento e recolha de resina. O saco de vácuo foi simultaneamente removido;



Figura 201 Vista da peça a produzir após a retirada da película do saco de vácuo

- Passadas mais 24 horas foi retirada primeiro na metade superior da estrutura a rede, o filme perfurado, o “peel ply” e as espirais de abastecimento de resina;

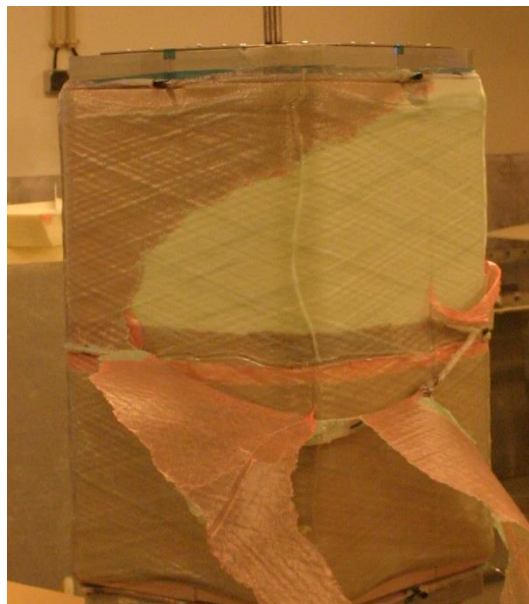


Figura 202 Vista da peça durante o processo de retirada da rede homogeneização, filme poroso e “peel ply” na metade superior

- Em seguida rodamos o mandril 180° e procedemos da mesma maneira para a metade inferior;



Figura 203 Vista de frente da peça fabricada após termos retirado a rede, o tecido poroso e o “peel ply”

- Finalizado este processo iniciamos a desmontagem da estrutura retirando primeiramente os topos;



Figura 204 Início do processo de desmontagem do mandril

- Em seguida retiramos toda a fita selante colocada no interior do mandril. Retirando as barras e os restantes parafusos procedeu-se à desmontagem da estrutura;

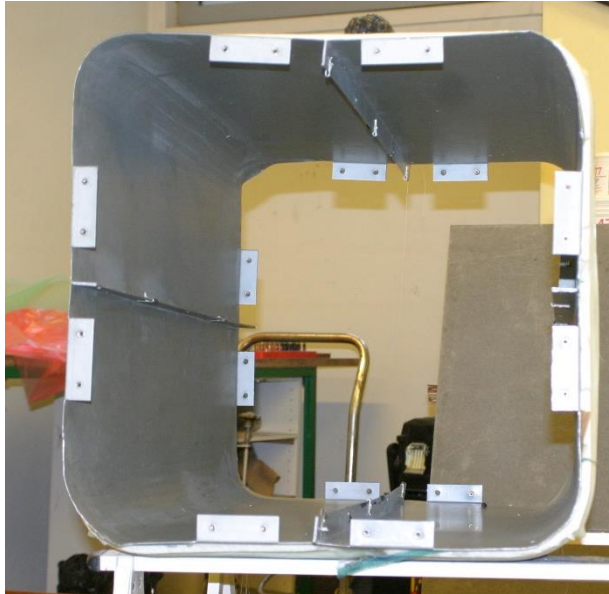


Figura 205 Mandril já parcialmente desmontado

- Retirou-se o mandril do interior do protótipo;



Figura 206 Aspecto da peça produzida após a retirada do mandril

- Removeu-se o Melinex® existente no interior protótipo;



Figura 207 Aspecto final da peça produzida

- Remontamos o mandril e limpamos os resíduos resultantes das diversas operações efetuadas;



Figura 208 Peça final produzida antes da operação de impregnação manual

- Verificando-se que devido a problemas relacionados com um processo de carácter experimental existiam zonas na pele inferior da sanduiche que não tinham sido impregnadas de resina. Resolvemos limitar este problema realizando uma impregnação manual nessas mesmas zonas;



Figura 209 Aspecto Geral do protótipo do corpo central do autocarro

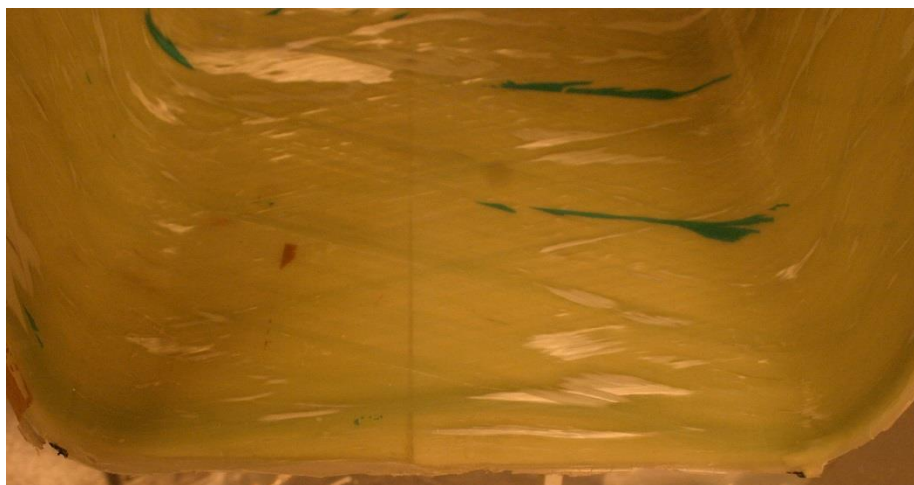


Figura 210 Pormenor do interior do protótipo produzido evidenciando as fibras secas



Figura 211 Aspecto geral do interior da peça produzida após a impregnação manual

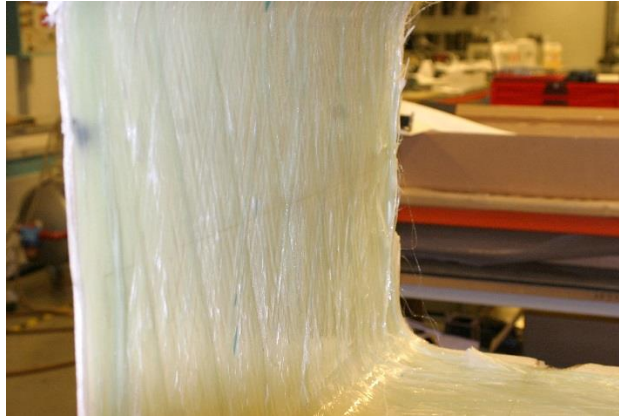


Figura 212 Vista em pormenor do interior da peça produzida após efetuada a impregnação manual

- Para terminar, com o auxílio de ferramentas apropriadas, retirou-se o excesso de resina resultante do processo de SCRIMP, cortando-se em seguida o protótipo no comprimento desejado.

6.2. Produção de um protótipo da lateral do autocarro por Pinch-off

Para testar a possibilidade de manter as fibras secas na região das janelas utilizando a técnica de Pinch-off foi necessário realizar o seguinte procedimento:

- Iniciamos o processo pela preparação do núcleo cortando uma placa de espuma de poliuretano com 325 milímetros de largura 350 milímetros de altura, correspondendo respetivamente á lateral do autocarro. Em seguida, e tal como já tinha sido realizado no processo de enrolamento da secção central do autocarro procedemos a perfuração do núcleo recorrendo as mesmas ferramentas anteriormente utilizadas;

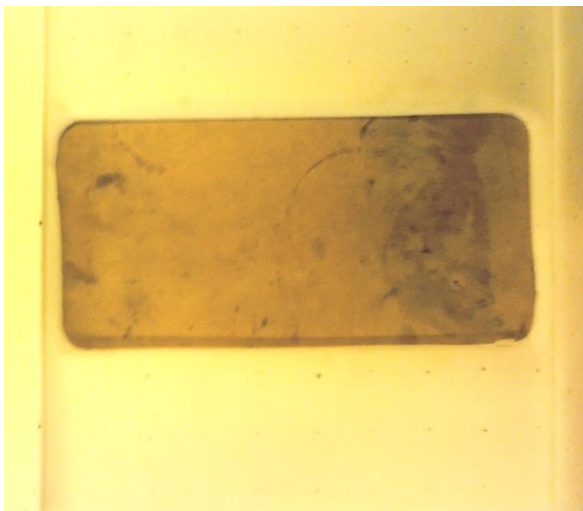


Figura 213 Preparação do núcleo para o processo de Pinch-off (corte do interior do núcleo com as dimensões da janela)

- Utilizando ferramentas de corte manual, procede-se ao corte de uma região do núcleo equivalente à área da janela central do autocarro. Ao mesmo tempo, procede-se a um corte a 45° nas extremidades da placa representativa do corpo do autocarro (conforme o representado nas próximas figuras). Com este corte pretende-se melhorar o escoamento da resina ao longo do núcleo;

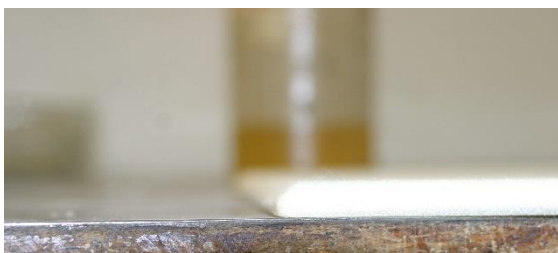


Figura 214 Preparação do núcleo de forma a melhorar a impregnabilidade do laminado

- Terminado o processo de preparação dos núcleos, começamos o trabalho de preparação dos moldes. Primeiramente procedemos à sua limpeza superficial utilizando acetona. Posteriormente realizamos um polimento superficial do molde e do contramolde, aplicando-lhes em seguida 5 camadas de cera desmoldante;
- Após aplicadas as 5 camadas de desmoldante e tendo sido realizado o seu polimento começamos a construir o laminado. Para tal, e na impossibilidade de realizarmos um enrolamento filamental, utilizamos tecido de fibra de vidro bidirecional +45 °/-45° de referência EBX600. Optamos por utilizar um tecido bidirecional pois este tecido apresenta uma maior semelhança à pré-forma obtida se tivesse sido concretizado um enrolamento filamental. Tendo concretizando a seguinte sequência de empilhamento: 2 camadas colocadas a 45° em relação ao eixo vertical, o núcleo de 10 mm, e por fim sobreposemos mais 2 camadas a 45° graus;



Figura 215 Corte e preparação dos tecidos de fibra de vidro

- Tendo terminado a etapa anterior colocamos o contramolde na região previamente cortada no interior do núcleo, apertando em seguida os 6 parafusos. Tal permite reduzir a permeabilidade das fibras, garantindo assim que as mesmas permanecem secas;

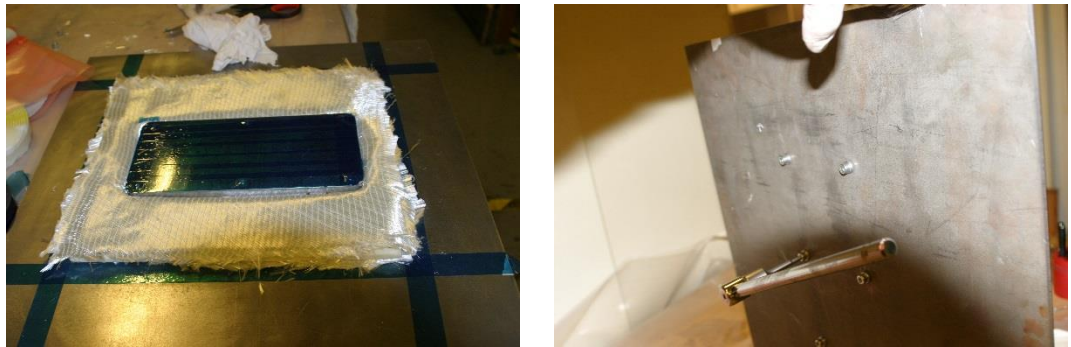


Figura 216 Colocação e aperto do contramolde sobre as fibras secas

- Terminado o processo de preparação da sanduiche começamos a preparação para a infusão. Para tal cortamos uma porção de “peel ply”, de filme perfurado e de filme para a produção do saco de vácuo. Colocando o “peel ply” e o filme perfurado por cima da sanduiche. Por cima destes materiais, na região aonde se encontra o contramolde, colocamos um tecido de respiro para limitar a possibilidade de o contramolde danificar o saco de vácuo;

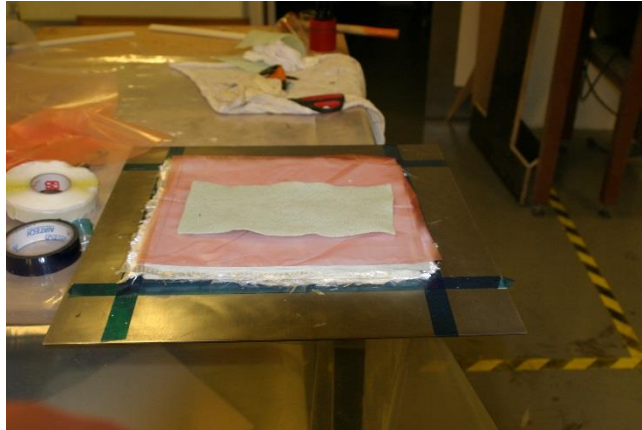


Figura 217 Deposição dos tecidos técnicos sobre as fibras

- Para possibilitar o abastecimento e recolha de resina colocamos 3 espirais. Duas das quais colocadas nas extremidades, servindo de entrada para a resina e uma colocada no centro da peça, por onde se faz a recolha dos excedentes da resina durante a impregnação. Para conseguirmos colar as espirais aos materiais já previamente depositados usamos fita selante;



Figura 218 Instalação das espirais necessárias para o processo de SCRIMP

- Por fim fechamos o saco de vácuo colando a saco á zona livre do molde com fita selante. Verificando-se que existiam pequenas fugas que era necessário tapar, usamos esse mesmo material para efetuar essa reparação instalando em seguida as tubagens que permitiram o abastecimento e recolha da resina;

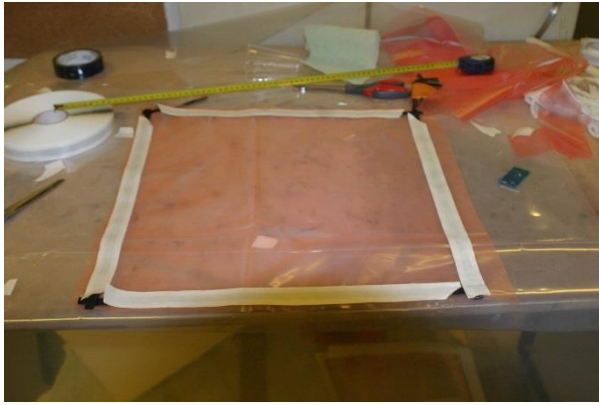


Figura 219 Corte e preparação do saco de vácuo



Figura 220 Instalação do saco de vácuo

- Posteriormente fomos preparar a resina para o processo de infusão. Neste processo utilizamos a mesma resina utilizada no protótipo da secção central;
- Tendo a resina pronta o processo de impregnação dura aproximadamente 15 minutos. Seria possível realizar a impregnação da sanduiche de uma forma mais rápida, no entanto como a resina tinha um tempo de cura em pote de 40 minutos optou-se por realizar uma impregnação mais lenta para garantir que todas as camadas do laminado eram corretamente impregnadas;



Figura 221 Aspeto Final da peça findo o processo de impregnação

- 56 Horas após o fim do processo de impregnação foi desligado o sistema de vácuo sendo retiradas as mangueiras de abastecimento e recolha de resina. Posteriormente foi retirada a película do saco de vácuo, o filme perfurado, o “peel ply” e as espirais de abastecimento de resina;
- Finalizado este processo realizamos a desmontagem da estrutura retirando primeiramente os parafusos, removendo em seguida o contramolde;

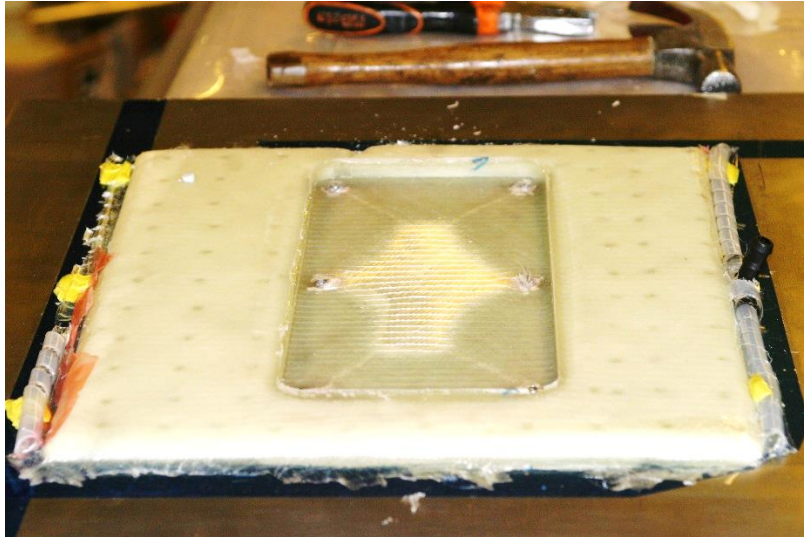


Figura 222 Aspeto da peça após termos retirado os tecidos técnicos e o contramolde

- Seguidamente remove-mos a peça produzida do molde;
- Seguidamente, procede-se ao corte das fibras que permaneceram secas;
- Utilizando lixas e outros materiais de polimento, lixamos a região das janelas e as extremidades do elemento produzido, conferindo á peça o seu aspeto final.

7. Avaliação de Custos

Apesar da fase ainda embrionária do projeto achamos importante realizar uma primeira aproximação ao estudo de avaliação dos custos. Um estudo realizado nesta fase do projeto não pode ser mais que um exercício meramente académico uma vez que existem várias variáveis dos custos que nesta fase ainda não conseguimos quantificar. Por exemplo, neste momento é ainda nos é impossível quantificar o custo dos moldes e mandris á escala real uma vez que durante o trabalho não procedemos ao seu dimensionamento estrutural e estes elementos são parte fulcral do custo de produção. No entanto, podemos quantificar o custo de uma máquina que permita o enrolamento da carroçaria. Uma máquina deste género apresenta um custo de aquisição na ordem de 250.000 euros (características técnicas do equipamento presentes no apêndice C).

Relativamente aos custos que conseguimos quantificar, e partindo do pressuposto que usaríamos um chassi e uma motorização previamente existente, os seus custos de aquisição e manutenção não diferem se realizarmos uma carroçaria segundo os processos tradicionais ou produzirmos a mesma em materiais compósitos. Relativamente aos restantes equipamentos interiores do autocarro podemos pelas soluções tradicionais e não se verifica nenhum ganho em termos económicos. Se aproveitarmos o carácter inovador do projeto para incluir acessórios mais leves a redução de peso pode ser significativa mas o seu custo não foi quantificado.

Tendo em atenção apenas á carroçaria, e considerando que uma carroçaria equivalente pesará em média entre 2000 e 2500 quilogramas e a nova solução proposta pesa aproximadamente 1500 quilogramas, assim sendo, a poupança de peso será no mínimo de 500 kg. Sendo. Com uma poupança de peso desta ordem de grandeza podemos pensar em duas soluções, uma passa pelo aumento do número de passageiros a transportar e a outra consiste na modificação da unidade motriz do veículo. Se optarmos por aumentar o número de passageiros e considerarmos que cada conjunto passageiro e bagagem tem uma massa de 80 kg, podemos transportar no mínimo mais 6 pessoas para igualar o peso de uma estrutura tradicional. É provável que para transportar mais 6 pessoas fosse necessário realizar uma reorganização nos espaços internos do autocarro. Se a opção for alterar a unidade motriz sem aumentar a carga no veículo podemos optar por uma motorização mais pequena e eficiente do ponto de vista energético ou aproveitar a redução de peso para instalar as baterias para um sistema híbrido de propulsão que alia-se um motor de combustão interna aos motores elétricos. Sabendo que qualquer uma das opções escolhidas permitiria uma redução de consumos que sabemos que ocorrerá mas que não dispomos de dados para quantificar. Sobre os restantes consumíveis do autocarro apuramos que os seus consumos ou intervalos de revisão não dependiam diretamente do peso da carroçaria como tal não se verifica uma alteração dos custos de utilização entre a solução proposta e a solução tradicional.

Com o desenvolvimento de carroçarias em materiais compósitos espera-se uma diminuição dos custos de manutenção e prevenção dos fenómenos corrosivos na ordem de 10% dos custos de aquisição de um veículo. De acordo com os fabricantes já com veículos destes em funcionamento a manutenção em caso de acidentes também é mais barata mas teríamos de construir e colocar em funcionamento um protótipo de forma a testar a veracidade dessas afirmações. Quanto às outras intervenções de manutenção o custo quer no modelo tradicional quer no modelo em materiais compósitos é similar.

Em suma, mesmo não dispondo da totalidade dos dados necessários, a análise prévia efetuada vai ao encontro dos resultados obtidos no projeto Litebus [10] que estimam a ocorrência de uma poupança de 3 a 4 % ao longo de todo o ciclo de vida do equipamento.

Em seguida, nas próximas tabelas apresentam-se uma árvore de processos simplificada para o ciclo de vida de um autocarro e os custos que conseguimos apurar juntos dos fabricantes e fornecedores.

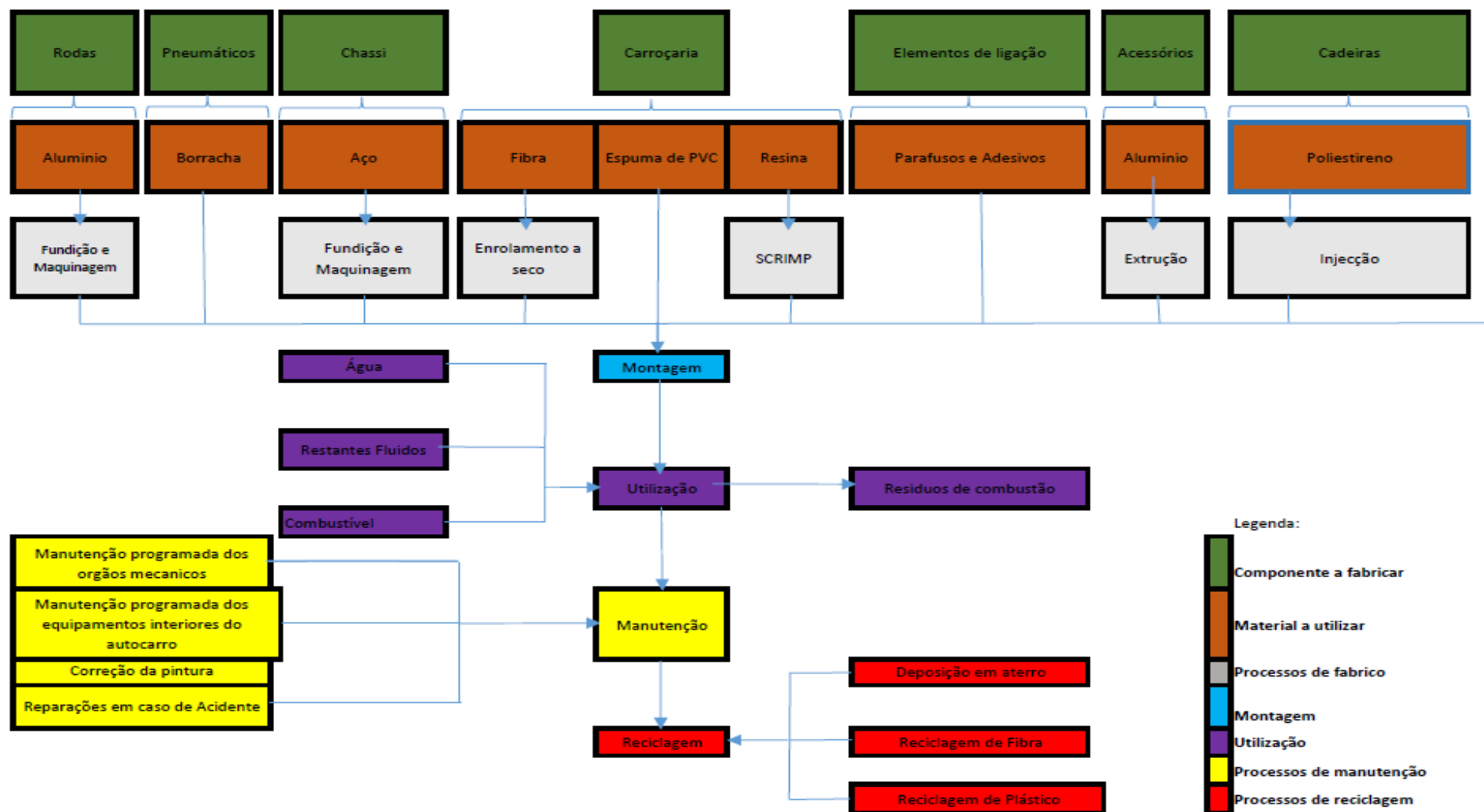


Figura 223 Árvore de processos simplificada para o ciclo de vida de um autocarro

Tabela 39 Custos inerentes á produção da carroçaria do autocarro

Produto ou Componente a fabricar: Carroçaria para Autocarro
 Data: 12/07/2013

Produção		Actividade/Materiais	Quantidade		Preço Unitário		Fornecedor	Preço[€]
	Projeto							
		Design						Custo Não Quantificado
		Produção de mandris						
	Materiais							
		Roving de Fibra de Vidro	833,6080962	[Kg]	14,46	[€/kg]	http://shop1.r-g.de/	12053,973
		Resina ortaphtalica de poliester	638,9816962	[Kg]	8	[€/kg]	HBQuímica	5111,8536
		Endurecedor	9,584725443	[Kg]	16,5	[€/kg]	HBQuímica	158,14797
		Espuma de PVC	284,2901603	[Kg]	55,24714052	[€/kg]	http://shop1.r-g.de/	15706,218
		“Peel ply”	143,662533	[m²]	3,4486	[€/m²]	http://shop1.r-g.de/	495,43461
		Tecido de respiro	16,52	[m²]	1,510855263	[€/m²]	http://shop1.r-g.de/	24,959329

III- Trabalhos Práticos

		Filme micro perfurado	143,662533	[m²]	1,05615	[€/m²]	http://shop1.r-g.de/	151,72918
		Saco de Vácuo	160	[m²]	2,3834	[€/m²]	http://shop1.r-g.de/	381,344
		Fita selante	40	[m]	2,448571429	[€/m]	http://shop1.r-g.de/	97,942857
		Desmoldante	5	[kg]	19	[€/kg]	HBQuímica	95
		Acessórios diversos					http://shop1.r-g.de/	590,02
	Processo de Fabrico							
		Enrolamento Seco						467,6655249
		SCRIMP						
							Custo Final	35334,29

IV- Discussão de resultados, Conclusões e Trabalhos Futuros

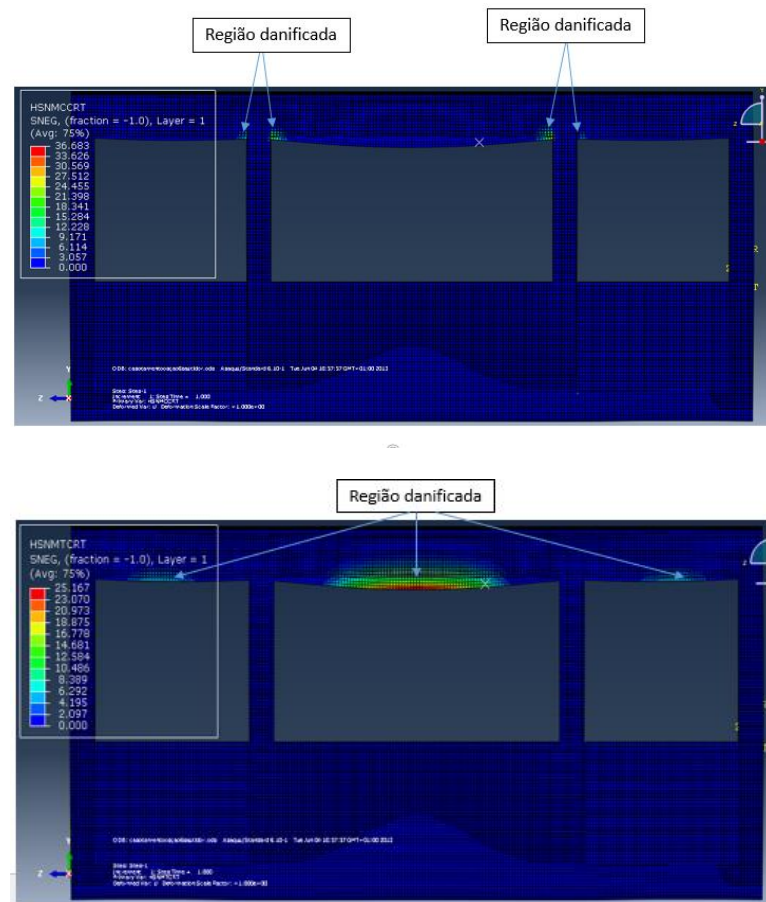
1. Discussão de Resultados e Conclusões

Nos instantes finais de cada projeto é imperioso despendar algum tempo a analisar a forma como o mesmo decorreu.

Neste caso o projeto, apesar de algumas contrariedades, decorreu dentro do esperado. Cabendo-nos agora reconhecer algumas limitações e falta de conhecimento sobre este género de construções mecânicas, bem como do *software* utilizado. Esta falta de conhecimento obrigou-nos a ter de dedicar mais algum tempo na fase de investigação e aprendizagem, quer do *software* quer do comportamento deste tipo de estruturas, faltando no fim esse mesmo tempo para o estudo de mais casos de carga e de outras soluções construtivas. Dispondo de mais tempo seria interessante o estudo do comportamento da carroçaria na subida de passeios e realizar uma abordagem a maior número de processos produtivos que conduziram á produção de um maior número de protótipos. No entanto os resultados obtidos experimentalmente indicam-nos que as soluções encontradas são passíveis de serem implementadas.

Relativamente ao *software* a principal dificuldade foi conseguir começar a trabalhar com o mesmo, uma vez que se trata de um software com um funcionamento muito próprio e que requer algum tempo de adaptação principalmente quando se pretende estudar uma estrutura de grandes dimensões com formas de alguma complexidade e num material que não é homogêneo e isotrópico como são os materiais metálicos. Também sentimos algumas dificuldades na compatibilização das diversas unidades usadas nas simulações, esta falta de compatibilização levou-nos a que inicialmente tivéssemos obtido resultados improváveis e injustificáveis que tivemos de perder algum tempo a tentar analisar. Após termos superado os problemas iniciais conseguimos chegar a resultados que achamos satisfatórios que seguidamente iremos analisar.

Findos todos os trabalhos de simulação verifica-se que o ensaio que provoca uma maior deformação é o ensaio de capotamento, em consequência dessas grandes deformações surgem os maiores danos na estrutura. Debruçando-nos então exclusivamente sobre os resultados deste ensaio, verifica-se que para a estrutura inicialmente proposta e para uma carga que provoca-se uma dissipação de energia de 85 quilojoules a estrutura formada apenas por 16 camadas de fibra de vidro dispostas de forma simétrica em relação a um núcleo de espuma de PVC apresentava valores de deformação que impediriam a sua homologação fora do contexto de uso urbano. Relativamente aos danos, podemos verificar que a estrutura de uma forma geral não suportaria um esforço deste género verificando-se que o dano era maior nas regiões de fronteira das janelas. Como tal, foi decido realizar mais algumas simulações de forma a entender qual o efeito que o aumento da espessura nessas regiões teria no aumento da resistência geral da estrutura e na consequente diminuição da deformação. Com essas simulações verificamos primeiramente que aumentando a espessura do núcleo existia uma melhoria bastante significativa dos resultados. Aumentando a espessura do núcleo conseguimos que a estrutura apesar de continuar a apresentar um dano excessivo nas regiões dos pilares apresentava uma deformação que permitia



Focando a nossa atenção nos trabalhos de produção de protótipos a nossa falta de preparação para a realização deste género de trabalhos culminou com a destruição de um protótipo na sua fase inicial de execução. No entanto, os resultados obtidos posteriormente deixam-nos satisfeitos pois efetuadas as devidas correções e aperfeiçoamentos é possível a obtenção da estrutura segundo os processos propostos.

Tendo em atenção a qualidade e rigidez do mandril utilizado ficamos muito satisfeitos por ter conseguido executar a técnica prevista sendo obtida uma peça que embora esteja longe da perfeição valida a ideia proposta. Tal como fica evidenciado nas figuras vistas anteriormente. Durante o procedimento experimental não conseguimos garantir que toda a peça fosse impregnada, para resolver este problema seria necessário um aprofundamento do estudo do processo de impregnação da pré-forma. Na prática se voltarmos a realizar o processo devemos aumentar o tempo de infusão. Para limitarmos o efeito do problema recorreremos a uma impregnação manual das regiões que não tinham sido molhadas no processo de infusão, embora este processo não seja o ideal visto que conduzirá a uma redução local das características mecânicas da peça é aceite a nível industrial como forma de resolver esta tipologia de problemas. Relativamente ao enrolamento da pré-forma verificou-se que realizamos uma programação da máquina que gera um enrolamento com um grande grau de entrecruzamento obtendo uma estrutura com uma maior quantidade de fibra, mais pesada e exigindo um tempo maior de impregnação do que a estrutura inicialmente pensada. A forma como é colocado o núcleo da sanduiche, apesar de ter permitido a obtenção do protótipo, também deve ser repensada uma vez que se verificou que era muito difícil a realização dos cantos da estrutura em arco utilizando apenas uma placa visto que a espuma tem uma baixa densidade. O material utilizado quando sujeito as tensões existentes na curvatura tem uma forte tendência a sofrer rotura. Esta técnica também seria de muito difícil execução num protótipo a escala real, sendo assim, devemos optar por realizar essas mesmas curvaturas com a utilização de múltiplas fatias desse mesmo material que após serem conformadas á forma do mandril devem ser lixadas de forma a garantir a uniformidade da concavidade obtendo-se assim a forma pretendida.

Analisando a técnica de redução de permeabilidade da fibra verifica-se que os resultados obtidos nesta primeira tentativa apesar de longe do que pretendíamos já permitem manter uma percentagem considerável de fibras secas.

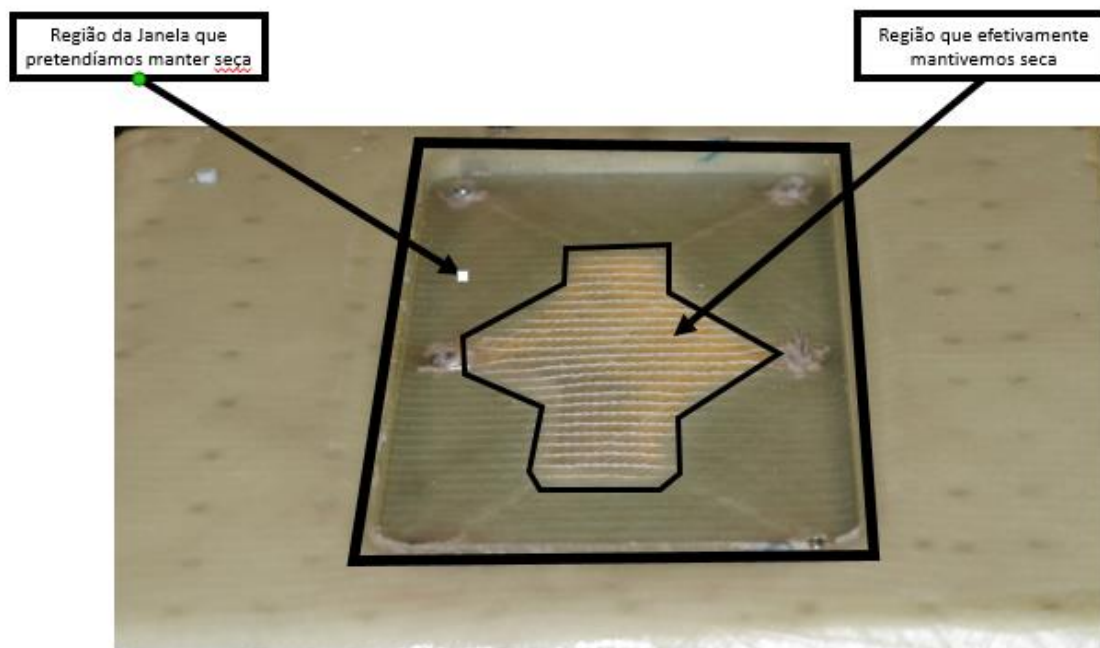


Figura 225 Resultado final do processo de Pinch-off com identificação das regiões secas

Após realizado o procedimento de Pinch-off constatamos que para aumentar a zona não impregnada de resina até próximo dos limites da região da janela teríamos que alterar um pouco os procedimentos realizados, sendo assim, achamos que o molde e o contra-molde devem possuir um melhor acabamento superficial que o utilizado uma vez que a resina utilizada terá sempre uma baixa viscosidade qualquer que seja a imperfeição superficial do molde e do contra-molde levará à entrada de resina para o interior da região que pretendemos manter seca. Para aumentar a pressão sobre as fibras e consequentemente baixar o seu grau de permeabilidade achamos que seria importante incorporar no contra-molde um vedante de silicone tal como o idealizado para a solução proposta para a produção de moldes e mandris da secção central do autocarro. Por fim, para aumentar a região seca teria de ser realizada uma alteração de fundo no processo de infusão da resina pois ao realizarmos uma entrada da resina pelas extremidades da peça a fabricar e o vácuo pelo interior da região que pretendemos manter seca estamos a permitir que a resina penetre sobre todas as pequenas imperfeições existentes no contato entre o molde, a fibra seca e o contra-molde diminuindo assim o sucesso da operação de Pinch-off. A nossa proposta para minimizar este problema passa por realizar a entrada da resina pelo centro da peça por cima do contra molde, que se encontra recoberto com fita desmoldante, e a saída da mesma pelas extremidades da peça a fabricar.

O trabalho efetuado ao nível da avaliação de custos e do ciclo de vida do produto permite-nos uma primeira abordagem ao tema sem no entanto ser muito completa ou conclusiva. Para melhorar então o trabalho efetuado neste âmbito seria necessário pelo menos a produção de um modelo à escala com os materiais indicados no processo de dimensionamento por forma a termos valores aproximados aos reais da quantidade de matéria-prima necessária e uma melhor estimativa do custo dos processos de enrolamento e de SCRIMP. Para realizar uma análise conclusiva sobre a vantagem do ponto de vista do custo e da sua amortização ao longo do ciclo de vida do produto seria necessário ter uma maior abertura junto dos fabricantes de carroçarias

tradicionais, ou seja, seria necessário dispor dos valores das operações de produção, de uso, de manutenção e de abate que uma estrutura tradicional tem para contrapor com os resultados obtidos para a solução em materiais compósitos.

Por fim este projeto foi bastante importante na etapa final da minha formação uma vez que me proporcionou conciliar conceitos inerentes a disciplinas das áreas da mecânica, da física, dos materiais e processos de fabrico e de gestão, lecionadas neste curso de engenharia aplicando-os na resolução de questões próximas da realidade.

2. Trabalhos Futuros

No futuro espera-se produzir a secção central do autocarro utilizando o mandril proposto e os materiais seleccionados de acordo com as indicações incluídas nas conclusões deste trabalho. Com um protótipo construído a uma escala fixa já seria possível a realização de ensaios práticos que aferissem na prática a qualidade dos trabalhos de simulação. Tendo o modelo sido validado seria interessante construir um modelo à escala real que seria posto em funcionamento de forma a avaliar o comportamento do mesmo quando sujeito a solicitações decorrentes do uso quotidiano. Por fim devíamos apresentar este trabalho à comunidade industrial por forma a avaliar qual o interesse efetivo da indústria neste género de soluções.

Referências Bibliográficas

- [1] Directiva 2001/85/CE do parlamento europeu e do conselho de 20 de Novembro de 2001 relativa a disposições especiais aplicáveis aos veículos destinados ao transporte de passageiros com mais de 8 lugares sentados além do lugar do condutor.
- [2] Regulation UNECE no.66 uniform provision concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure.
- [3] “Bus History” Disponível em: <http://auto.indiamart.com/commercial-vehicles/bus-history.html> Acesso em: 2 de abril de 2013.
- [4] “Histoire générale des transports (em francês)” Disponível em: http://www.amtuir.org/03_htu_generale/htu_1_avant_1870/htu_1.htm Acesso em: 2 de abril de 2013.
- [5] Couto N., Aguiar C. , Torres Marques A., Pina Cabral G. , José Miguel Silva, Bernardo Almada Lobo, Paulo Neves, Helder David Miranda, Maria José Marques, Francisco Pires, F. Gomes de Almeida, F. Xavier de Carvalho, J. F. Duarte ; “Concepção e fabrico duma carroçaria, em material compósito, para autocarro”. CIBEM 10, Porto, Portugal, 2011.
- [6] “Cutting Edge.Revolutionary design composite structure rust-proof”. NABI a Brand of North American Bus Industries Disponível em: <http://www.nabusind.com/NABI/Metro%2045C%20Brochure.pdf> Acesso em: 20 de Março de 2013.
- [7] Winkel J.; “Team-built bus body bests all”. Composites Technology Disponível em: <http://www.compositesworld.com/articles/team-built-bus-body-bests-all> Acesso em: 2 de Maio de 2013.
- [8] “New hybrid electric bus takes advantage of composites”. Composites Technology Disponível em: <http://www.compositesworld.com/articles/new-hybrid-electric-bus-takes-advantage-of-composites> Acesso em: 2 de Maio de 2013.
- [9] “Overview of HCV” Disponível em: <http://www.hcv-project.eu/overview.shtml> Acesso em: 2 de Maio de 2013.
- [10] “‘LITEBUS’ – the bus that bounced” Disponível em: http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/_litebus___the_bus_that_bounced_en.htm Acesso em: 2 de Maio de 2013.
- [11] Observatório de Segurança Rodoviária; “Relatório-Anual Sinistralidade Rodoviária Vítimas no local Disponível em: <http://www.ansr.pt/LinkClick.aspx?fileticket=ZikKbS8IDLA%3d&tabid=402&mid=1338&language=pt-PT> Acesso em: 17 de Maio de 2013.
- [12] Albertsson P., Falkmer T. ; “Is there a pattern in European bus and coach incidents? A literature analysis with special focus on injury causation and injury mechanisms”. Accid Anal Prev 2005;37:225-33

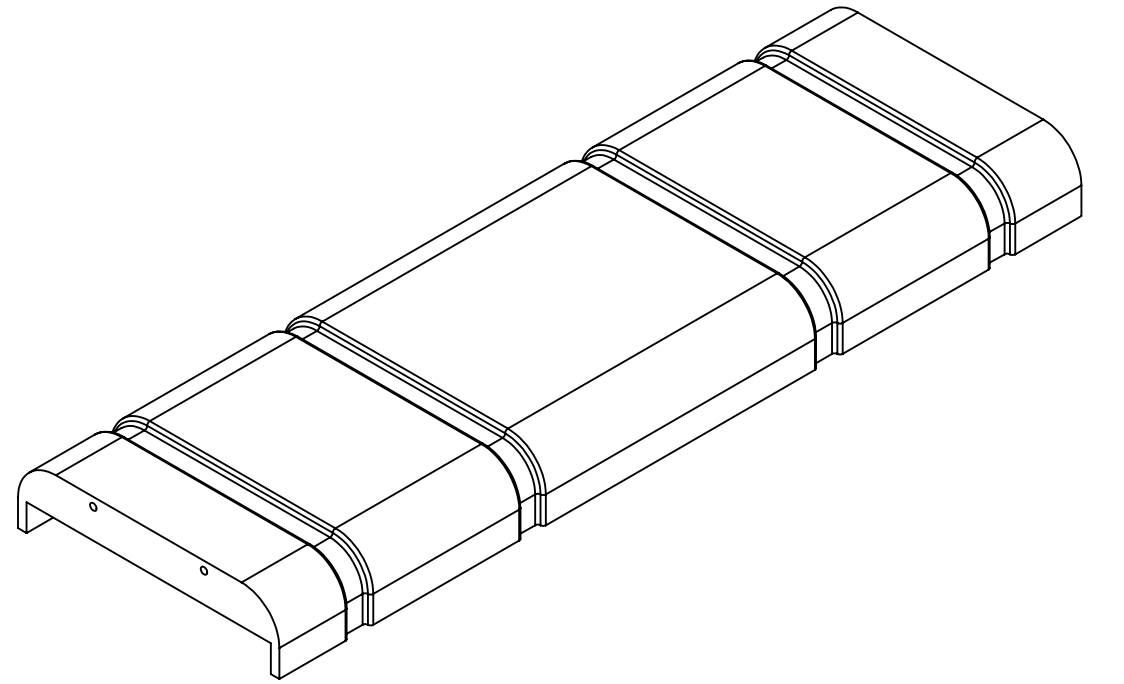
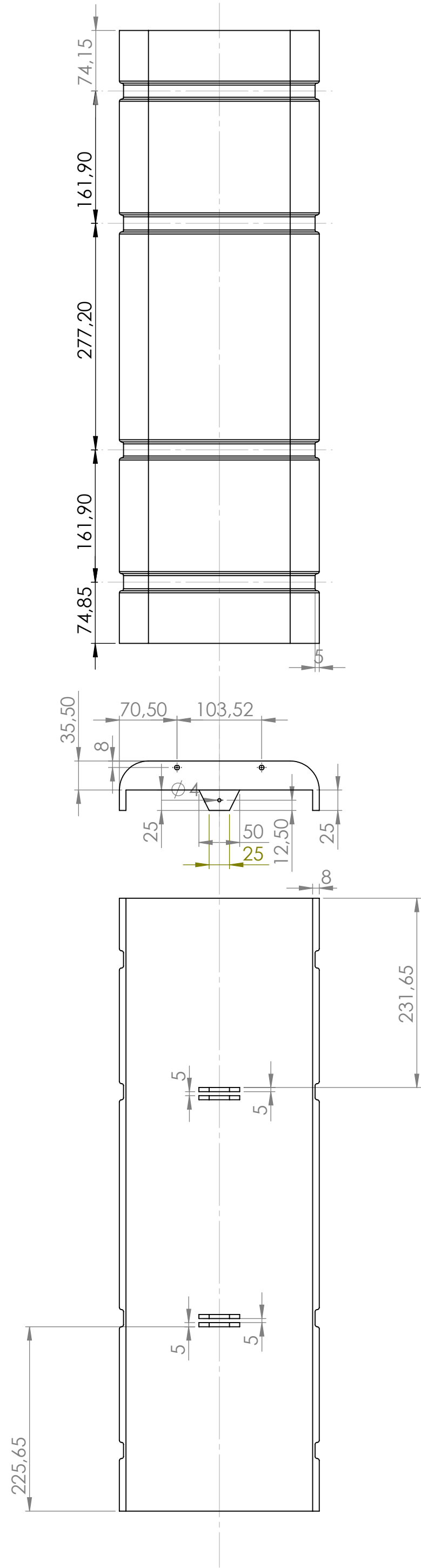
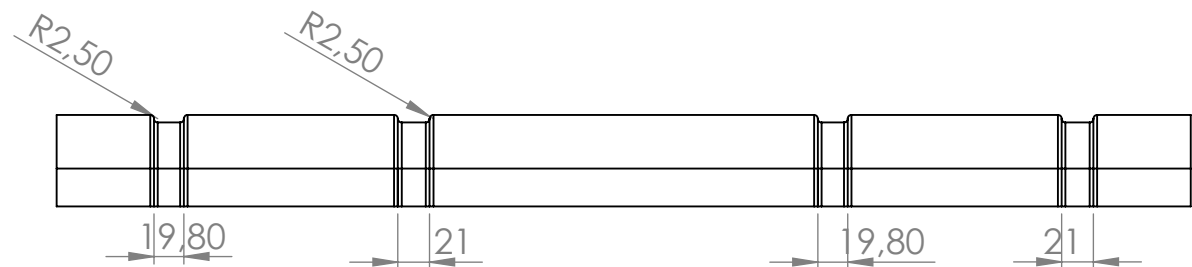
- [13] Magalhães, A., “Apontamentos da disciplina de materiais não metálicos”; ISEP
- [14] WILLIAMS, C., SUMMERSCALES, J., GROVE, S. “Resin infusion under flexible tooling (RIFT): a review”, Composites: Part A v. 27, pp. 517-524, 1996.
- [15] SHIH, C. H., LIU, Q. L., LEE, L.J. ; “Tackified SCRIMP for aerospace applications”. “Proceedings of the 45th International SAMPE Symposium and Exhibition - Science of Advanced Materials and Process Engineering Series” v. 45, pp. 776-787, Long Beach, CA, May 21-25, 2000.
- [16] HEIDER, D., LI, W., ENGEL, K., GILLESPIE, J. W., “Improvement of surface quality during VARTM processing”. In: SAMPE 2003 Technical Conference Proceedings - Applications, Emerging Markets and Evolving Technologies, pp. 282-289, Long Beach, CA, May 11-15, 2003.
- [17] AMOUROUX, S. C. “On the role of membrane to improve quality of VARTM processed composites”, SAMPE Journal v. 42, n. 1, pp. 31-40, 2006.
- [18] Martins de Brito, Fernando J.M. “Comportamento mecânico das camadas usadas na construção de materiais compósitos de matriz polimérica”.; INEGI; Porto, 1997.
- [19] S. T. Peters, W. D. Humphrey e R. F. , “Filament winding composite structure fabrication”, Foral, segunda edição, SAMPE.
- [20] D. V. Rosato and C. S. Grove, “Filament winding: its development, manufacture, applications, and design”; Interscience Publishers (John Wiley & Sons).
- [21] F. Duvall. 1999. “Cost Comparisons of Wet Filament Winding Versus Prepreg Filament Winding For Type II and Type IV CNG Cylinders”. Proceedings of ICCM 12, Paris, France.
- [22] Allen, H. G., “Analysis and Design of Structural Sandwich Panels”, Pergamon Press, 1969.
- [23] Davies, J. M., “Lightweight Sandwich Construction, Blackwell Publishing”, 2001.
- [24] BROUGHTON, W. R.; CROCKER, L. E. e GOWER, M. R. L.; “Design Requeriments for Bonded and Bolted Composite Structures”, NPL Report MATC(A)65,2002.
- [25] LEITE, M.; Estudo Experimental, Analítico e Numérico de Vigas em Construção Sandwich Reforçada com Aplicações ao Transporte Refrigerado de Bens Perecíveis. Tese de Mestrado, IST/UTL, Lisboa, 2004.
- [26] “Mechanisms generating spring-in of curved composites”, M. R. Wisnom, T. Garstka, N. Ersoy, K. D. Potter, Department of Aerospace Engineering, University of Bristol, BS8 1TR, U.K.
- [27] Rudd , C.D.; Long, A.C.; Kendall, K.N.; Mangin, C. G. E; “ Liquid moulding technologies Resin transfer moulding, structural reaction injection moulding and relates processing techniques”; SAE Interncional, 1997.
- [28] Torres Marques, A; “Apontamentos da disciplina de materiais compósitos”; FEUP,2012 Disponível em: https://sigarra.up.pt/feup/pt/conteudos_geral.ver?pct_pag_id=249640&pct_parametros=pv_ocorrendia_id=275858&pct_grupo=37126&pct_grupo=34997#34997 Acesso em: 2 de abril de 2013..
- [29] USEPA, 2001. U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation. LCAccess - LCA 101. 2001. Disponível em: <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/lca101.htm>. Acesso em: 24 de Julho de 2013.

- [30] ISO 14040, (1997). Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Genève: Suiça.
- [31] Directiva 97/27/CE “Directiva 97/27/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 22 Julho de 1997 relativa às massas e dimensões de determinadas categorias de veículos a motor e seus reboques e que altera a Directiva 70/156/CEE”.
- [32] Dalmo I.G. Costa, Éder L. Albuquerque, Adriana Reis, Gustavo Panosso e Paulo Sollero; “Análise numérica de falhas em laminados usando um critério baseado em fenômenos físicos” Disponível em: <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/3370/3288>. Acesso em: 24 de Julho de 2013.
- [33] Davila C., Camanho P., e Rose C. “Failure criteria for frp laminates. Journal of CompositeMaterial”, 39:323–345, 2005
- [34] Candeias, David; (2009); “Estudo das Tensões Interlaminares e Rotura de Elementos Curvos em Materiais Compósitos”; Tese de Mestrado, IST/UTL, Lisboa.
- [35] PARÍS, F.; CAÑAS, J., MARÍN, J. C.; “Introduccion al Analisis y Diseño con Materials Compuestos” Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, 2006.
- [36] INEGI, Salvador Caetano, Alusingen, Cranfield Impact Center, Teroson; “Long life public service vehicle project study”; sept 1995

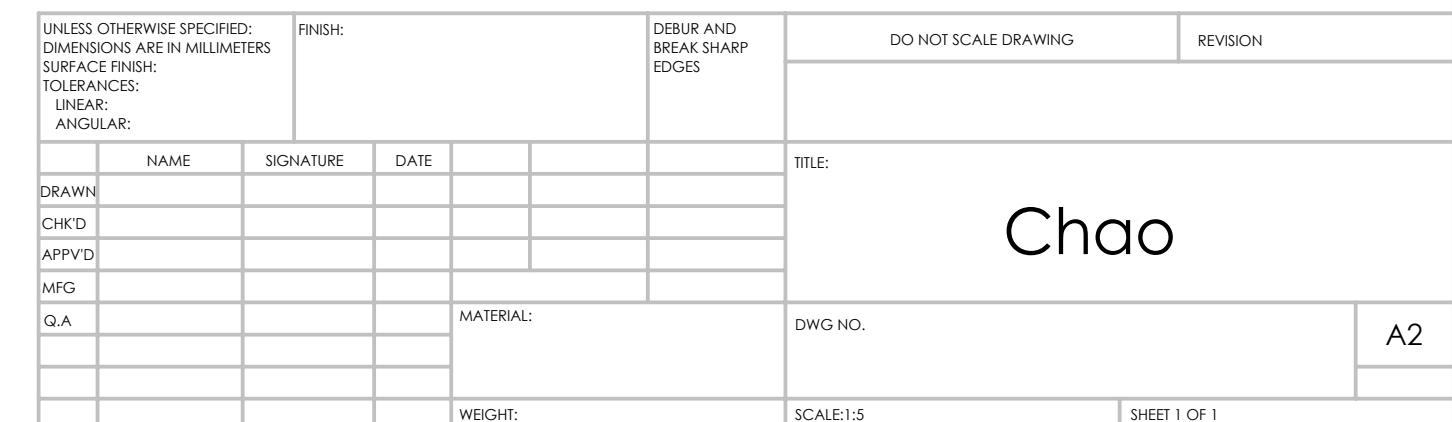
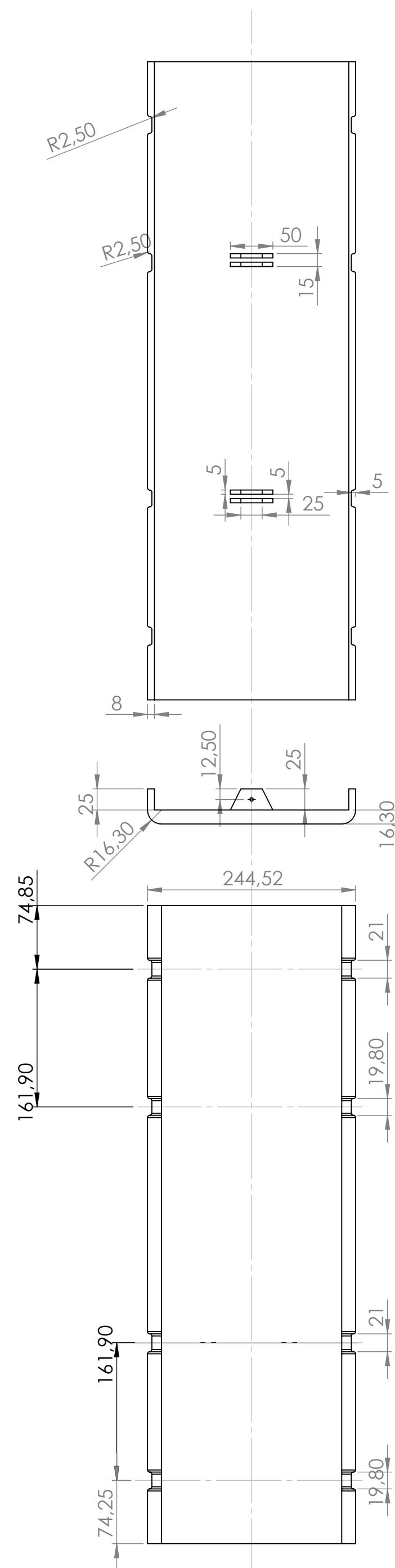


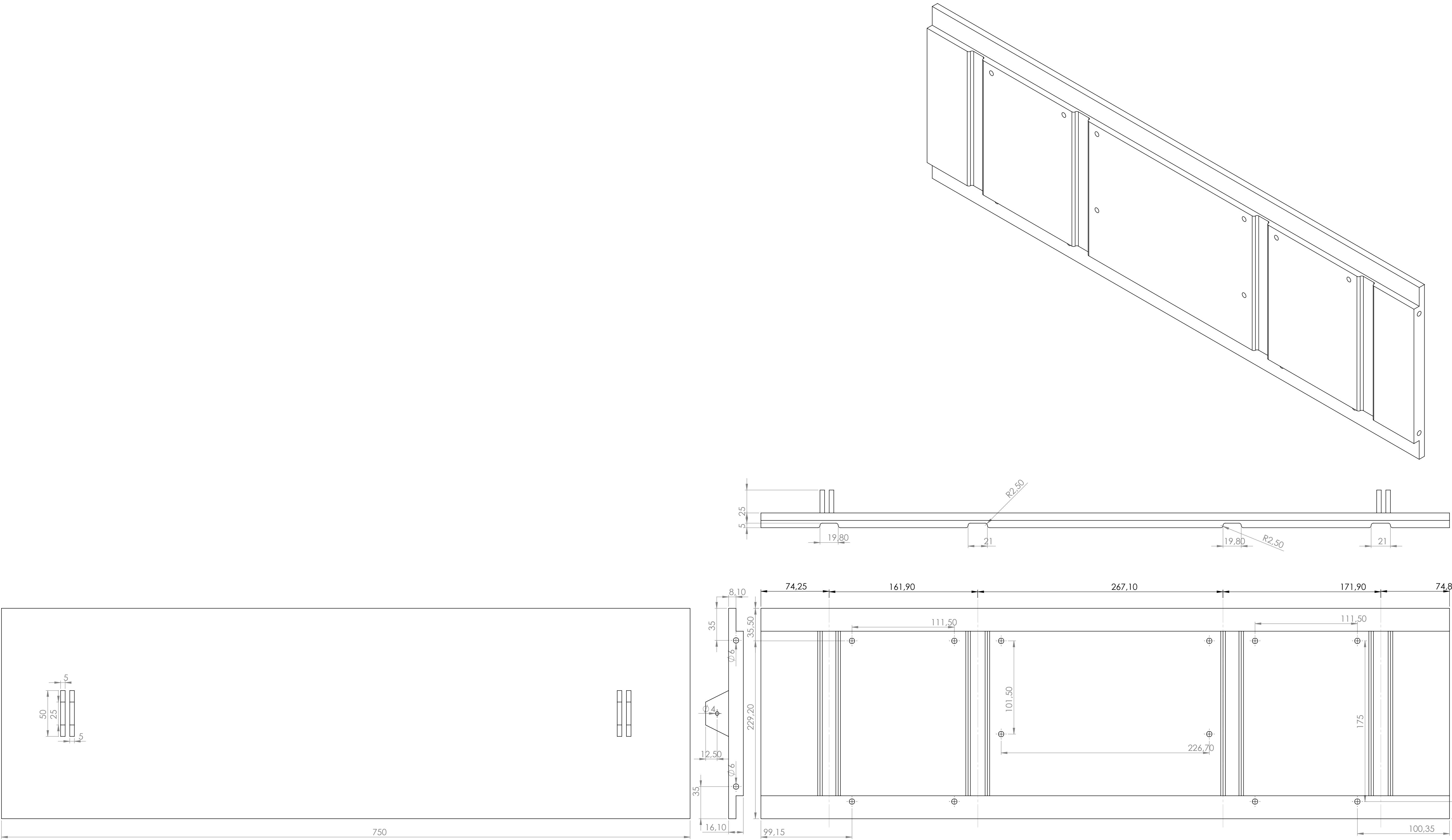
Apêndice A

Desenhos técnicos do Mandril Proposto

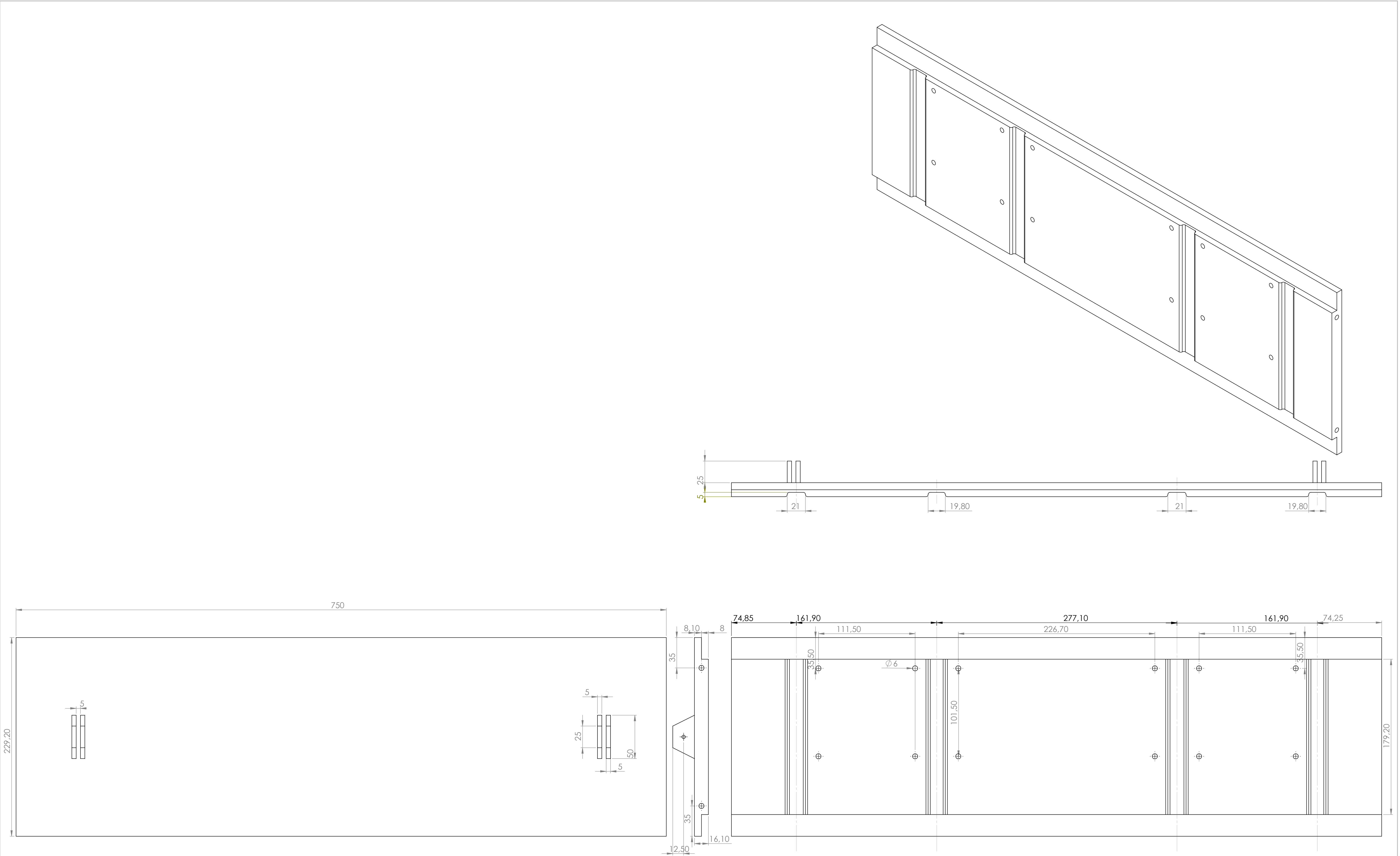


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:						FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
	NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE: <div>Teto</div>				
DRAWN													
CHK'D													
APP'VD													
MFG													
Q.A													
							MATERIAL:		DWG NO.				
							WEIGHT:		SCALE:1:5				
										SHEET 1 OF 1			

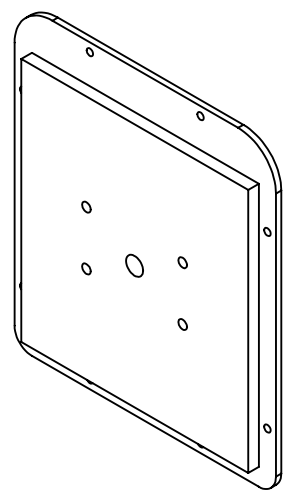
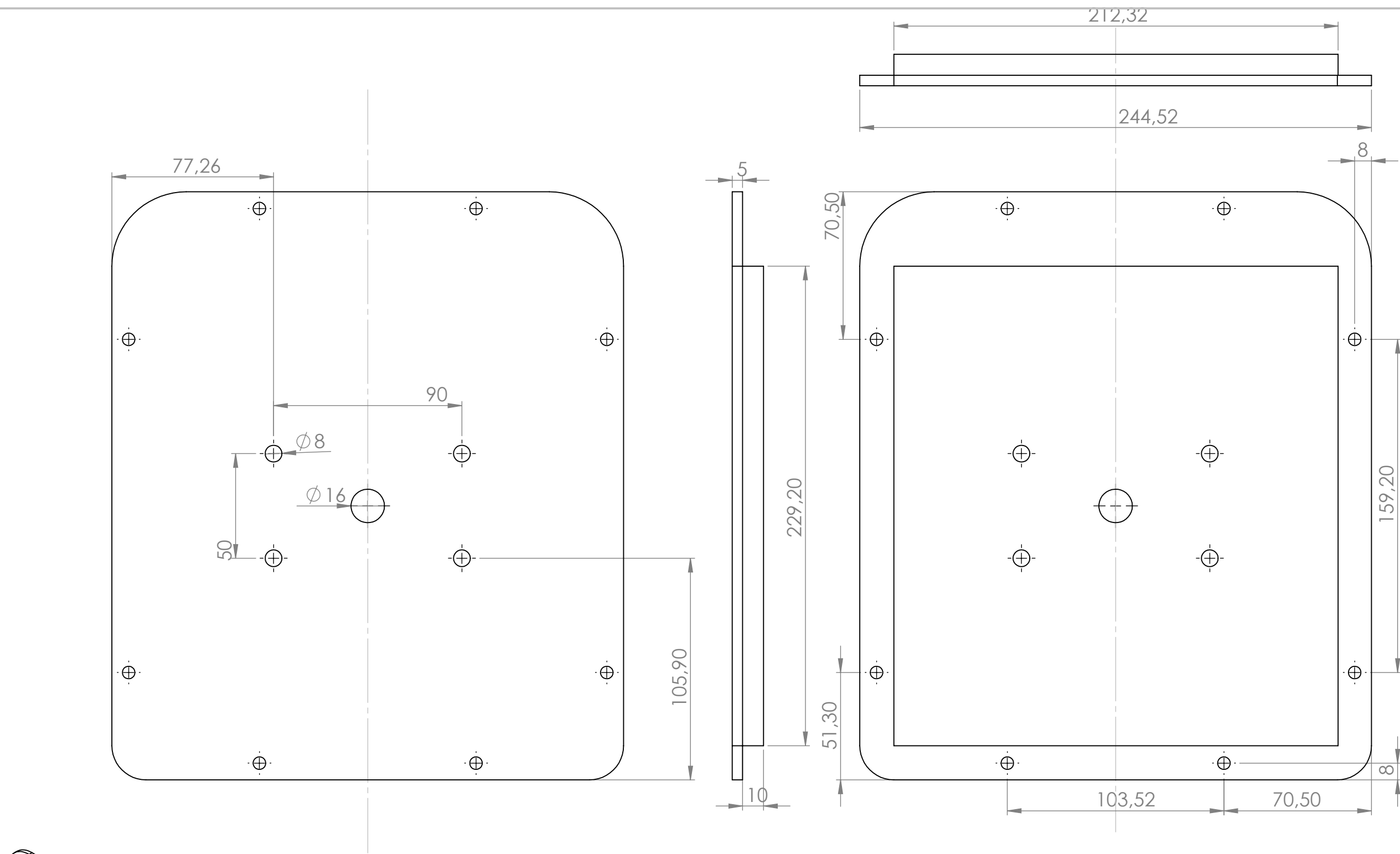




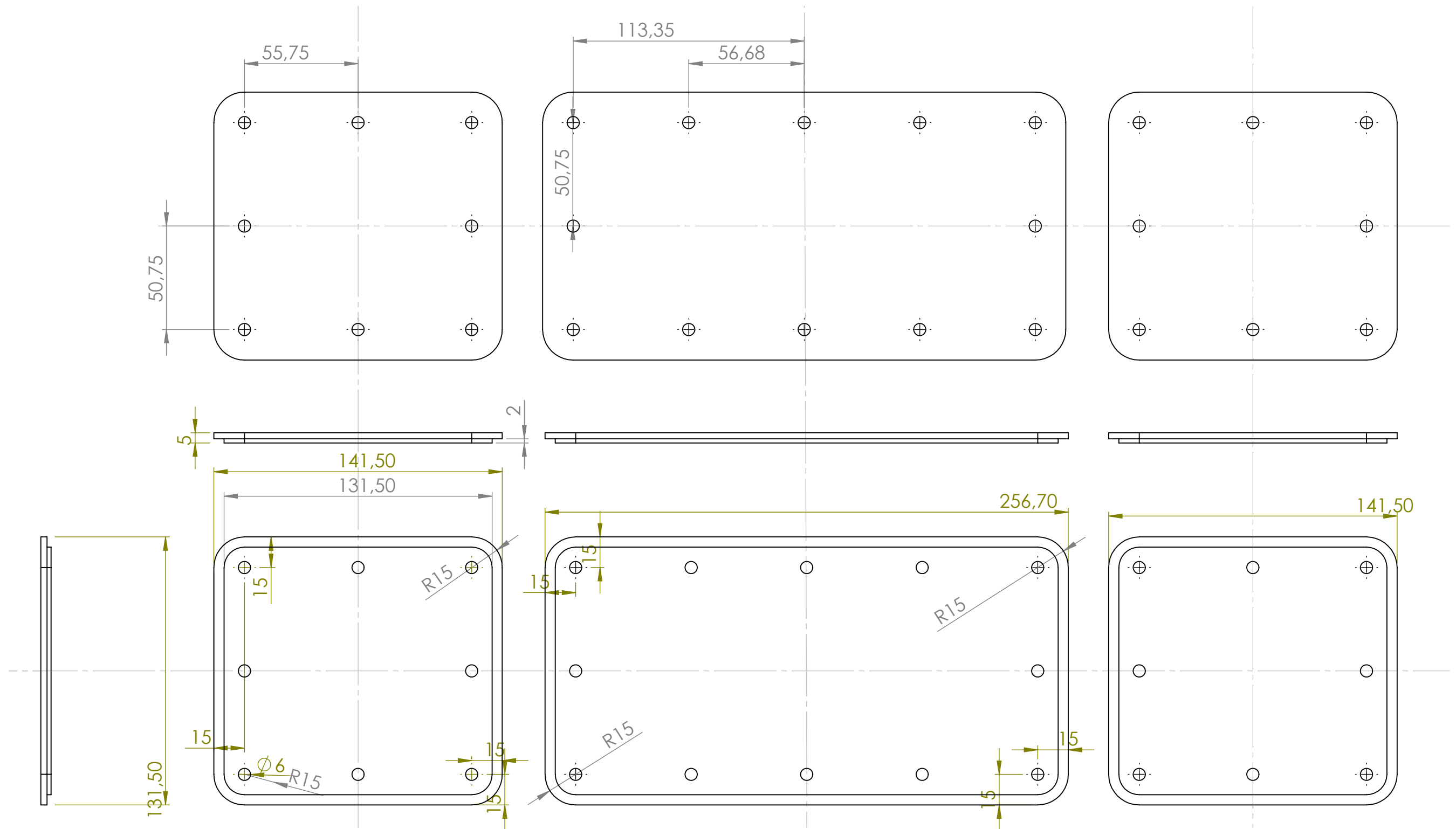
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION			
NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE: <div>Lateral Direita</div>					
DRAWN:													
CHK'D:													
APP'D:													
MFG:								DWG NO.				A1	
Q.A.						MATERIAL:							
								SCALE:1:5				SHEET 1 OF 1	
						WEIGHT:							



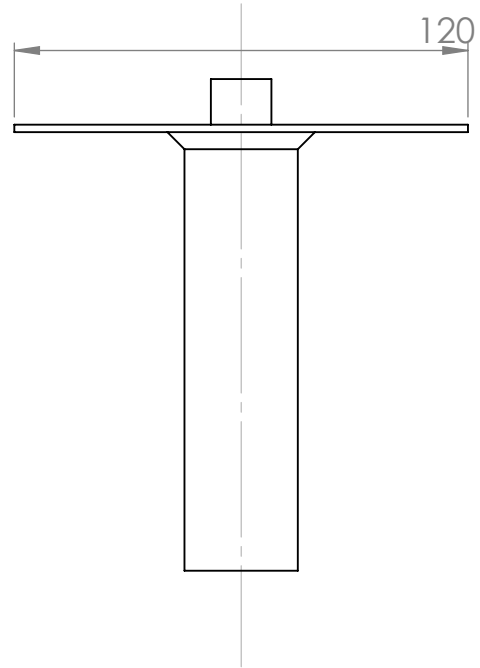
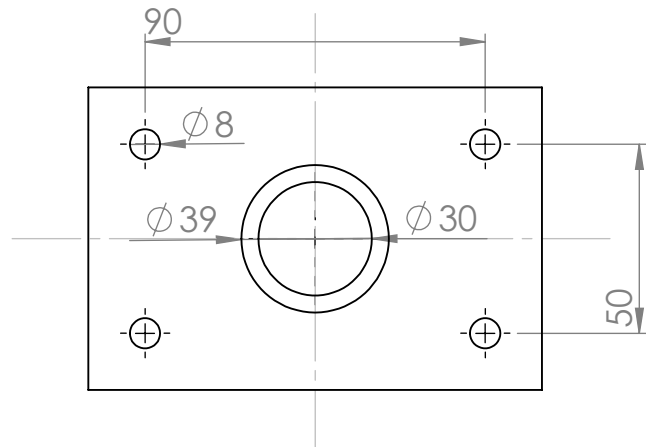
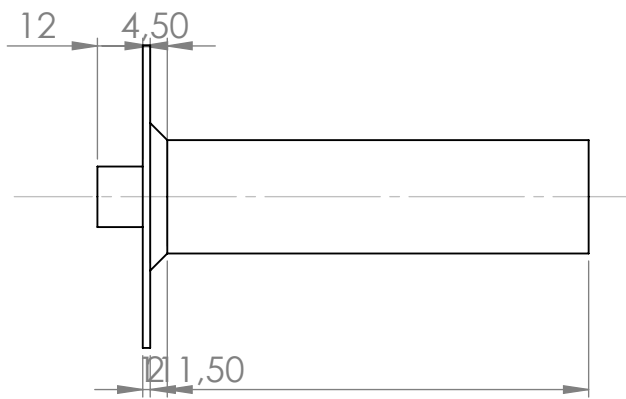
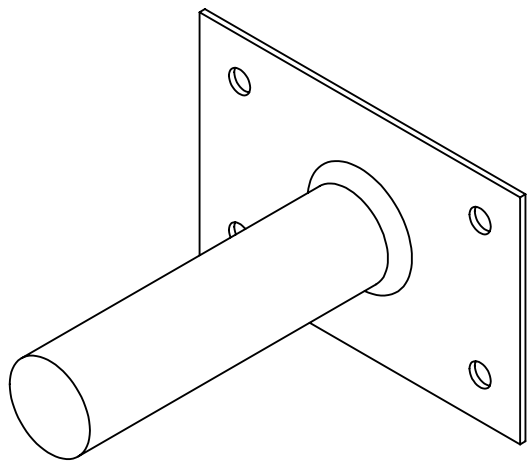
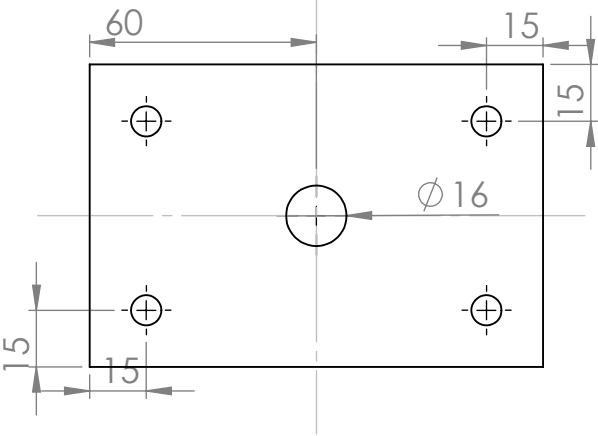
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME				SIGNATURE		DATE		<div>TITLE:</div> <div>Lateral Esquerda</div>			
DRAWN:											
CHK'D:											
APP'D:											
MFG:											
Q.A.						MATERIAL:		<div>DWG NO.</div> <div>A1</div>			
						WEIGHT:		<div>SCALE:1:2</div> <div>SHEET 1 OF 1</div>			



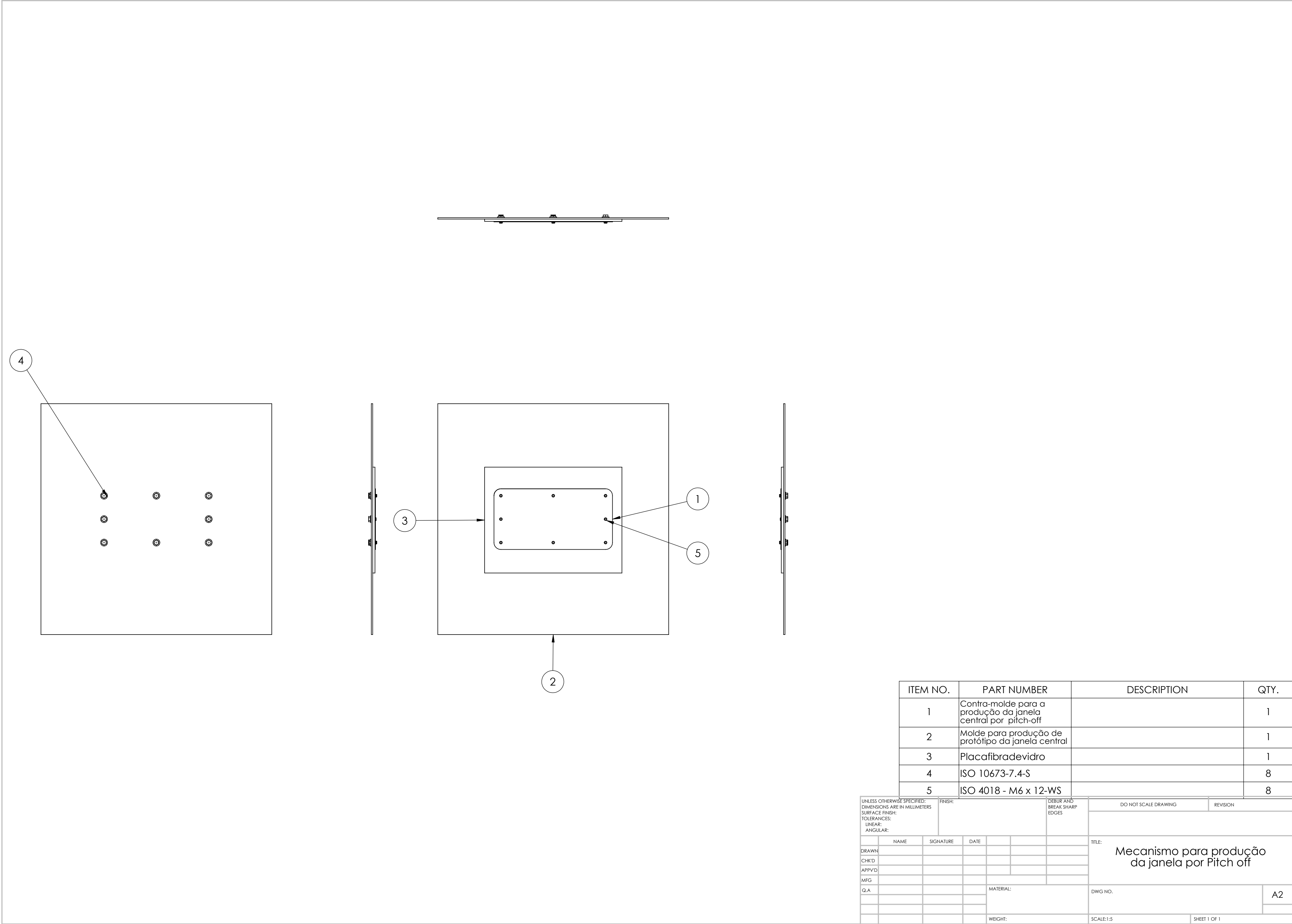
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHK'D										Topos	
APPV'D											
MFG											
Q.A											
								MATERIAL:		DWG NO.	
										A3	
								WEIGHT:		SCALE:1:2	
										SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION			
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE: Contra-molde lateral esquerda (pitch-off)		DWG NO.		A3	
CHK'D													
APPV'D													
MFG													
Q.A													
								MATERIAL:					
								WEIGHT:		SCALE: 1:2		SHEET 1 OF 1	

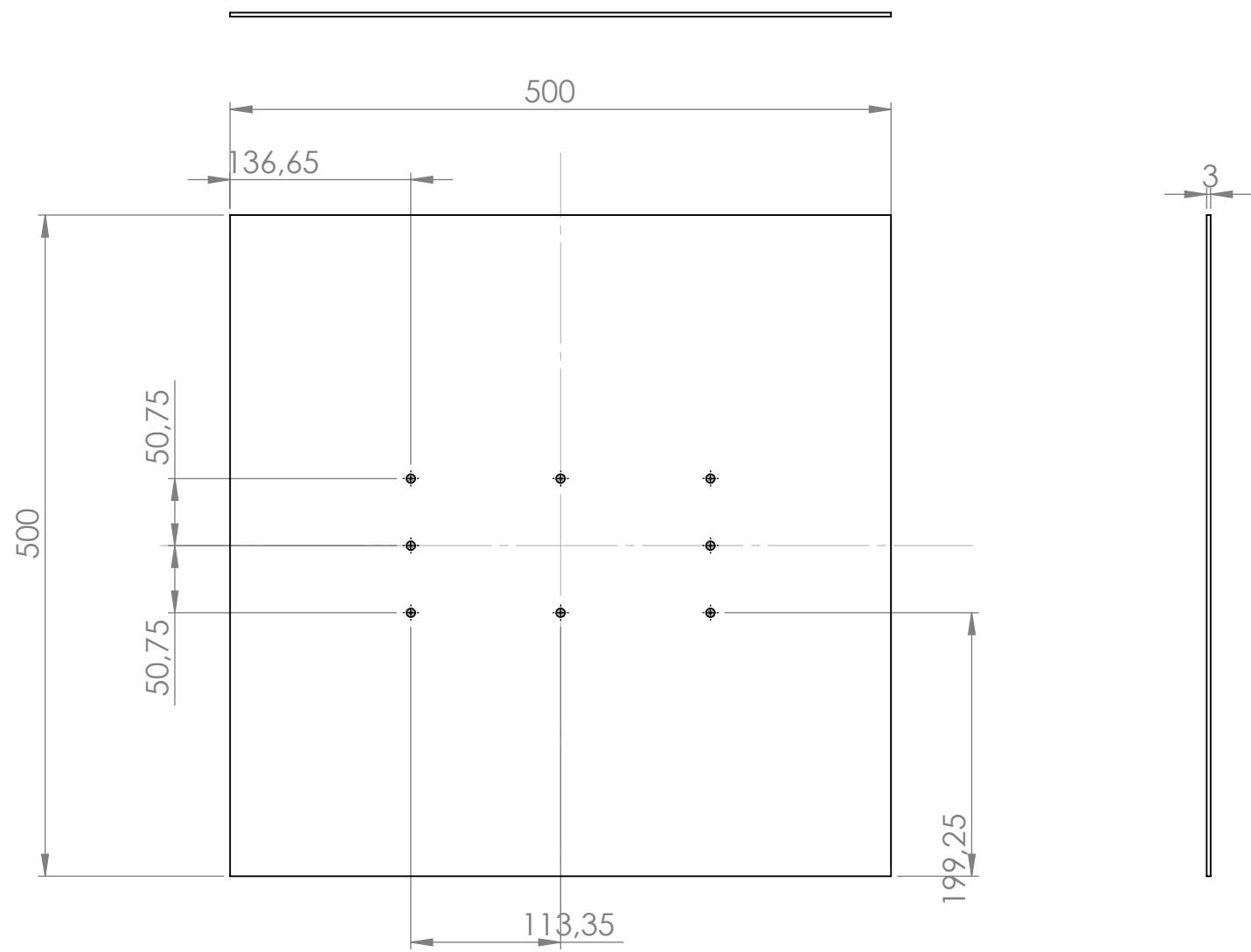


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE: Elemento de Fixação do mandril					
DRAWN											
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.				A3	
				WEIGHT:		SCALE:1:2			SHEET 1 OF 1		

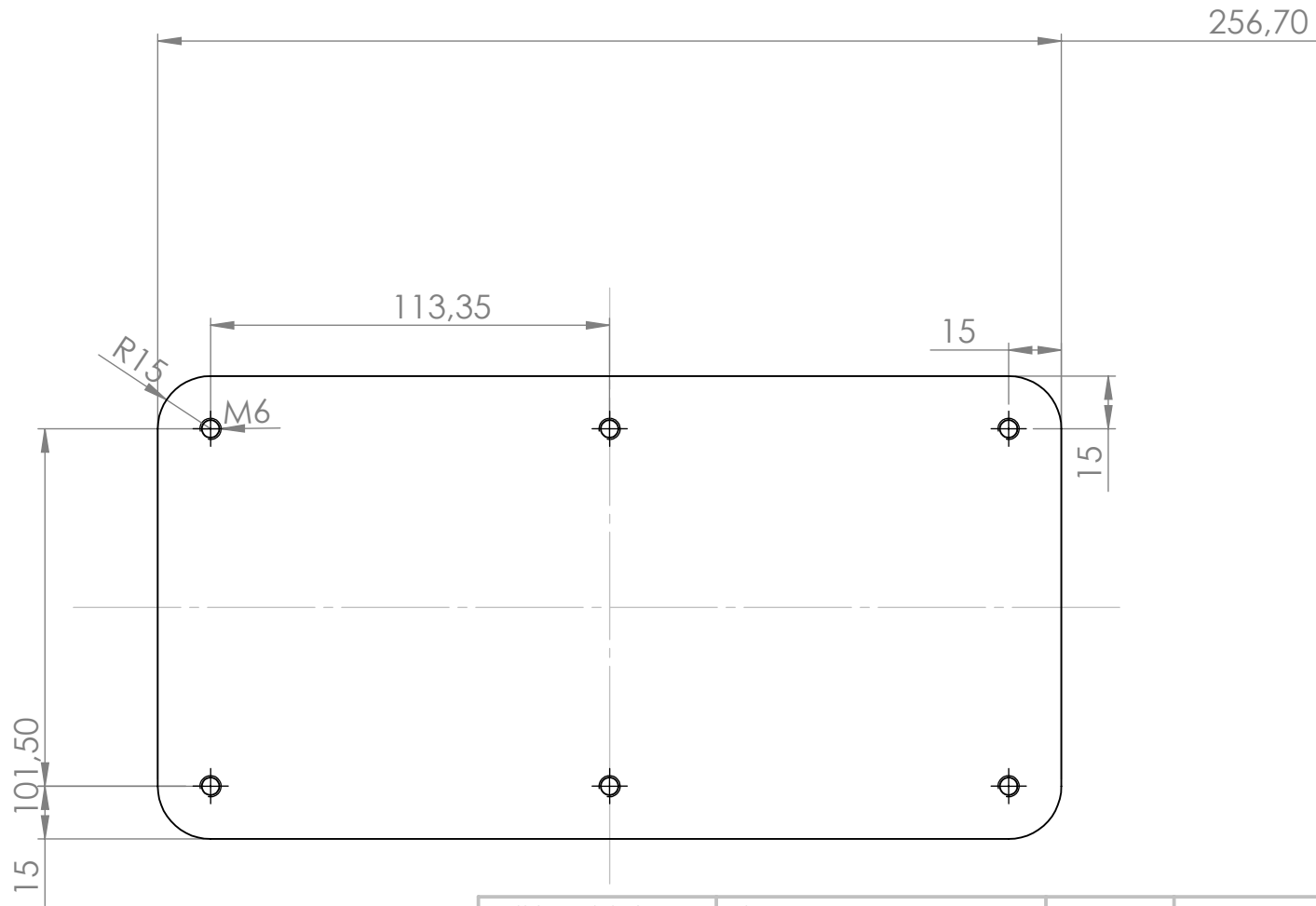
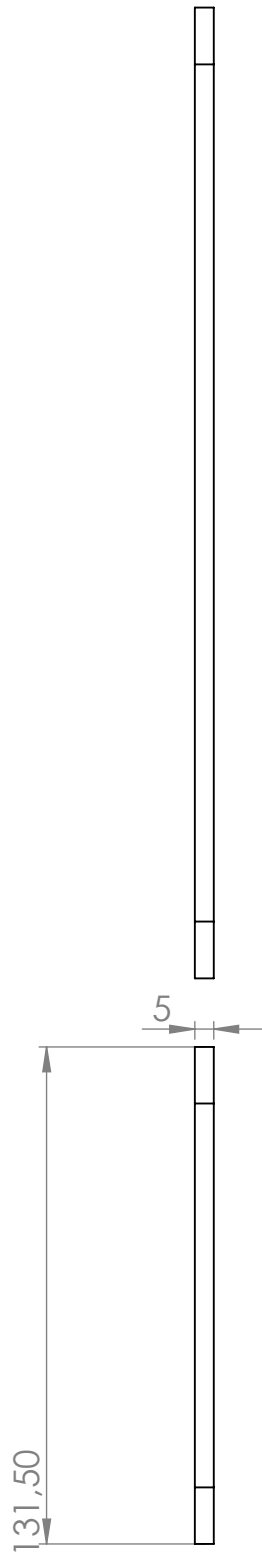


ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Contra-molde para a produção da janela central por pitch-off		1
2	Molde para produção de protótipo da janela central		1
3	Placa fibro de vidro		1
4	ISO 10673-7.4-S		8
5	ISO 4018 - M6 x 12-WS		8

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE: Mecanismo para produção da janela por Pitch off			
DRAWN											
CHK'D											
APP'VD											
MFG											
Q.A											
				MATERIAL:				DWG NO.		A2	
				WEIGHT:				SCALE:1:5		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
	NAME	SIGNATURE	DATE					TITLE: Molde para produção de protótipo da janela central			
DRAWN											
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A				MATERIAL:			DWG NO.			A3	
				WEIGHT:			SCALE:1:5			SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE: Contra-molde para a produção da janela central por pitch-off	
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A								MATERIAL:		DWG NO.	
										A3	
								WEIGHT:		SCALE:1:2	
										SHEET 1 OF 1	



Apêndice B

Características técnicas da Fibra e Resina
Utilizados

Biresin® CR80 Composite resin system

Areas of Application

- For infusion and injection processing
- Specially for applications when curing temperatures of $\geq 75^{\circ}\text{C}$ can not be implemented
- The hardeners **Biresin® CH80-1** und **CH80-2** can be applied for the manufacture of smaller parts in hand lay-up processing too

Product Benefits

- Approved by Germanischer Lloyd for the production of components
- One resin (A) with four hardeners (B) with different reactivity
- Uniform mixing ratio of 100 : 30
- The reactivity can be adapted by mixing the hardeners
- Because of low mixed viscosity fast infiltration of dry fabrics and nonwovens
- Glass transition temperatures up to 80°C dependent on curing conditions

Description

- Basis Two-component-epoxy-system
- Resin (A) **Biresin® CR80**, epoxy resin, tranlucent, unfilled
- Hardener (B) **Biresin® CH80-1**, amine, colourless to yellowish
- Hardener (B) **Biresin® CH80-2**, amine, colourless to yellowish (also available in blue)
- Hardener (B) **Biresin® CH80-6**, amine, colourless to yellowish (also available in blue)
- Hardener (B) **Biresin® CH80-10**, amine, colourless to yellowish

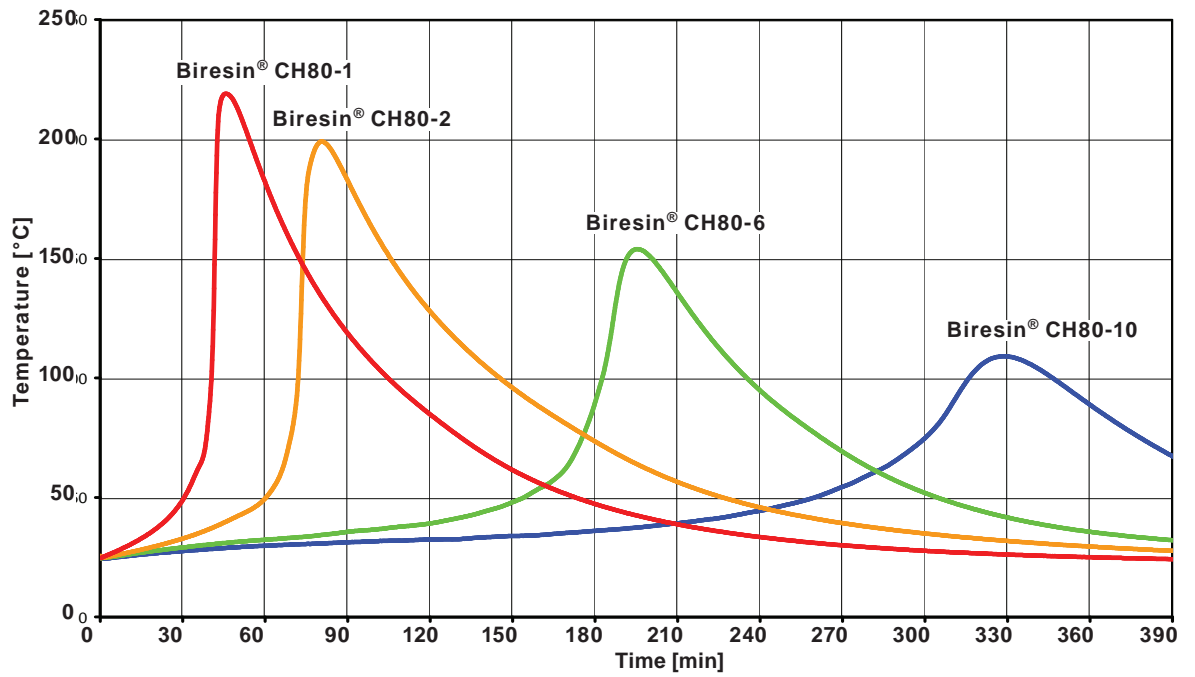
Physical Data		Resin (A)		Hardener (B)		
Individual Components		Biresin® CR80	Biresin® CH80-1	Biresin® CH80-2	Biresin® CH80-6	Biresin® CH80-10
Viscosity, 25°C	mPas	900	50	45	< 10	< 10
Density, 25°C	g/ml	1.13	1.00	0.99	0.95	0.95
Mixing ratio	in parts by weight	100	30			
			Mixture			
Potlife, 100 g / RT, approx. values	min		45	80	190	330
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPas		400	350	230	210

Processing

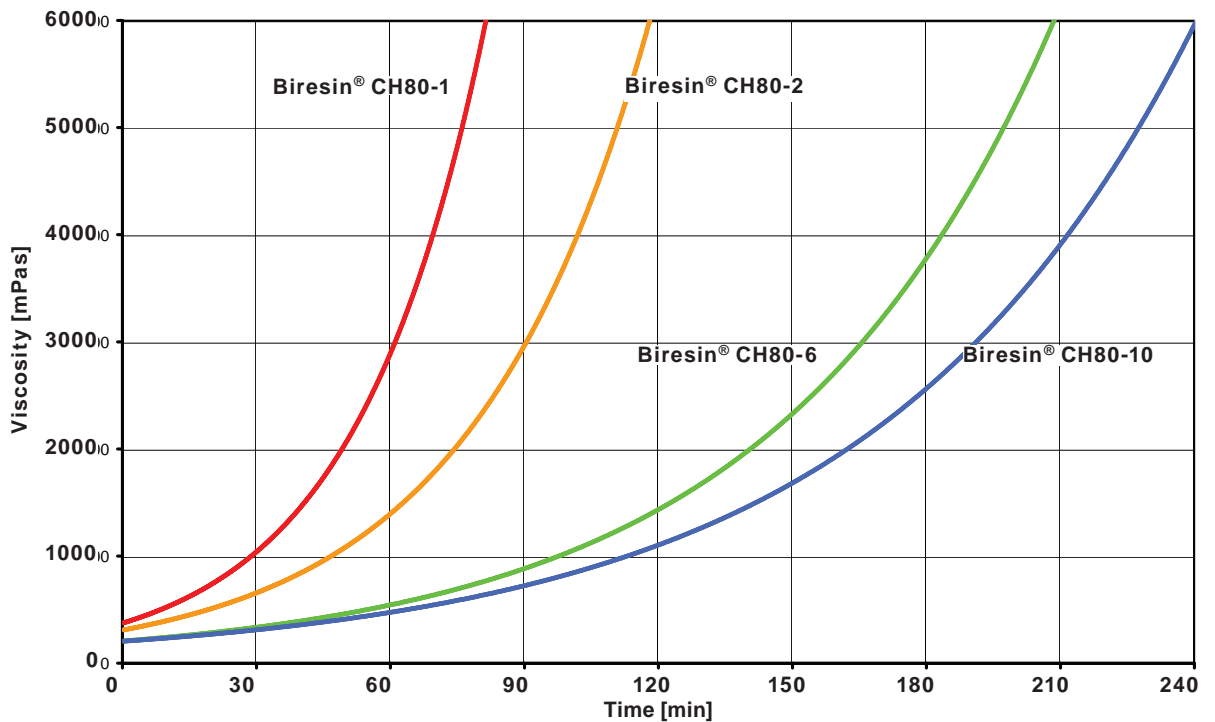
- The material and processing temperatures should be $18 - 35^{\circ}\text{C}$.
- With the hardeners **Biresin® CH80-1** and **Biresin® CH80-2** demoulding after room temperature curing is possible.
- With the hardeners **Biresin® CH80-6** and **Biresin® CH80-10** curing at 45°C before demoulding is required dependent on components.
- To clean brushes or tools immediately Sika Reinigungsmittel 5 is recommended.
- Additional informations are available in "Processing Instructions for Composite Resins".



Development of Exotherm of Biresin® CR80-Resin(A)-Hardener(B)-Mixtures, 100g / RT, insulated



Development of Viscosity of Biresin® CR80-Resin(A)-Hardener(B)-Mixtures, 25°C



Test conditions: rotation viscosimeter, plate/plate, measuring gap 0,2 mm



Mechanical Data, neat resin specimen at different post curing conditions

Part 1: approx. values after 16 h / 55°C (source: accredited testing institute)

Biresin® CR80 resin (A)	with hardener (B) Biresin®		CH80-1	CH80-2	CH80-6	CH80-10
Density	ISO 1183	g/cm³	1.17	1.17	1.16	1.16
Flexural E-Modulus	ISO 178	MPa	3,400	3,800	3,600	3,600
Tensile E-Modulus	ISO 527	MPa	3,200	3,400	3,400	3,300
Flexural strength	ISO 178	MPa	120	132	127	122
Elongation at maximum flexural strength	ISO 178	%	4.9	4.7	4.6	4.6
Tensile strength	ISO 527	MPa	69	76	72	69
Elongation at maximum tensile strength	ISO 527	%	3.9	3.8	3.6	3.6
Water absorption	ISO 175	%	0.37	0.25	0.30	0.31

Part 2: approx. values after 16 h / 55°C + 3 h / 70°C (source: accredited testing institute)

Biresin® CR80 resin (A)	with hardener (B) Biresin®		CH80-1	CH80-2	-	-
Density	ISO 1183	g/cm³	1.17	1.17	-	-
Flexural E-Modulus	ISO 178	MPa	3,300	3,600	-	-
Tensile E-Modulus	ISO 527	MPa	3,000	3,300	-	-
Flexural strength	ISO 178	MPa	116	129	-	-
Elongation at maximum flexural strength	ISO 178	%	5.2	5.1	-	-
Tensile strength	ISO 527	MPa	65	73	-	-
Elongation at maximum tensile strength	ISO 527	%	4.3	4.0	-	-
Water absorption	ISO 175	%	0,37	0,26	-	-

Part 3: approx. values after 16 h / 55°C + 8 h / 70°C (source: accredited testing institute)

Biresin® CR80 resin (A)	with hardener (B) Biresin®		-	-	CH80-6	CH80-10
Flexural E-Modulus	ISO 178	MPa	-	-	3,400	3,400
Tensile E-Modulus	ISO 527	MPa	-	-	3,300	3,200
Flexural strength	ISO 178	MPa	-	-	126	121
Elongation at maximum flexural strength	ISO 178	%	-	-	5.3	5.3
Tensile strength	ISO 527	MPa	-	-	73	70
Elongation at maximum tensile strength	ISO 527	%	-	-	4.2	4.2

Part 4: approx. values after 12 h / 80 °C (source: Sika internal)

Biresin® CR80 resin (A)	with hardener (B) Biresin®		CH80-1	CH80-2	CH80-6	CH80-10
Density	ISO 1183	g/cm³	1.18	1.18	1.17	1.17
Shore hardness	ISO 868	-	D 86	D 86	D 86	D 86
Flexural E-Modulus	ISO 178	MPa	2,700	2,800	2,900	2,900
Tensile E-Modulus	ISO 527	MPa	2,900	2,900	3,000	3,000
Flexural strength	ISO 178	MPa	117	120	126	124
Compressive strength	ISO 604	MPa	101	107	110	106
Tensile strength	ISO 527	MPa	78	81	83	80
Elongation at break	ISO 527	%	7.1	6.1	6.3	6.5
Impact resistance	ISO 179	kJ/m²	84	75	68	76

Thermal data of neat resin specimen at different post curing conditions							
Biresin® CR80 resin (A)		with hardener (B) Biresin®		CH80-1	CH80-2	CH80-6	CH80-10
Post curing conditions							
Heat distortion temperature	16 h/55°C	ISO 75A	°C	69	69	67	66
	16 h/55°C + 3 h/70°C	ISO 75A	°C	73	74	-	-
	16 h/55°C + 8 h/70°C	ISO 75A	°C	-	-	72	72
Glass transition temperature		ISO 11357	°C	88	92	85	85

Packaging

Individual components	Biresin® CR80 resin (A)	1000 kg; 200 kg; 30 kg; 10 kg net
	Biresin® CH80-1 hardener (B)	180 kg; 25 kg; 3.0 kg net
	Biresin® CH80-2 hardener (B)	180 kg; 25 kg; 3.0 kg net
	Biresin® CH80-2 hardener blue (B)	20 kg net
	Biresin® CH80-6 hardener (B)	900 kg; 180 kg; 20 kg; 3.0 kg net
	Biresin® CH80-6 hardener blue (B)	20 kg net
	Biresin® CH80-10 hardener (B)	900 kg; 180 kg; 25 kg; 3.0 kg net

Storage

- Minimum shelf life of Biresin® CR80 resin (A) is 24 month and of Biresin® CH80-1, CH80-2, CH80-6 and CH80-10 hardener (B) is 12 month under room conditions (18 - 25°C), when stored in original unopened containers.
- After prolonged storage at low temperature, crystallisation of resin may occur. This is easily removed by warming up for a sufficient time to 50-60°C.
- Containers must be closed tightly immediately after use. The residual material needs to be used up as soon as possible.

Health and Safety Information

For information and advice on the safe handling and storage of products, users should refer to the current Safety Data Sheet containing physical, ecological, toxicological and other safety related data.

Disposal considerations

Product Recommendations: Must be disposed of in a special waste disposal unit in accordance with the corresponding regulations.

Packaging Recommendations: Completely emptied packagings can be given for recycling. Packaging that cannot be cleaned should be disposed of as product waste.

Value Bases

All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

Legal Notice

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.



Further information available at:

Sika Deutschland GmbH
Subsidiary Bad Urach
Stuttgarter Str. 139
D - 72574 Bad Urach
Germany

Tel: +49 (0) 7125 940 492
Fax: +49 (0) 7125 940 401
Email: composites@de.sika.com
Internet: www.sika.com



Statement of Approval



Approval No. **WP 1220037 HH**

The material described below complies with the applicable requirements as given in the Rules and Regulations of Germanischer Lloyd. On this basis the material is

approved as **Laminating Resin**

for the construction of components provided that the recommendations for use as specified by the producer are observed.

Type	Biresin CR80 - Series
Description	Two Component Epoxy Resin System
Producer	SIKA Deutschland GmbH Stuttgarter Str. 139 72574 Bad Urach Germany
Normative Reference	Rules for Classification and Construction, II - Material and Welding Technology Part 2 Non-Metallic Materials

This document consists of this page and a one-page annex which is integral part of the approval.

This Statement of Approval is valid until 2016-01-31.

Hamburg, 2012-06-04

Germanischer Lloyd

Guido Michalek

Christian Wildhagen

Statement of Approval



ANNEX

Approval No. WP 1220037 HH

Date: 2012-06-04

Page 1 of 1

Reference Documents	Technical specifications deposited at Germanischer Lloyd Head Office.
Assessed Documents	<ul style="list-style-type: none">- Technical Data Sheet- Test Report No. B175/7 issued by IMA Dresden- Quality Control Documents
Fields of Application	Construction of FRP laminates of components, on condition that the fibre reinforcements comply with the applicable requirements of the Germanischer Lloyd and are compatible to the resin.
Approved Variants	Epoxy Resin Biresin CR80 with following hardeners: <ul style="list-style-type: none">- CH80-1- CH80-2- CH80-6- CH80-10
Limitations	Any significant changes in design and/or quality of the material will render the approval invalid.
Remarks	This certificate supersedes the approval WP 0820005 HH.
End of Annex	

Germanischer Lloyd

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'W. H.', is written over the 'Germanischer Lloyd' text.

Glass, E grade (0.4-12 micron monofilament, f)

General properties

Designation

Glass, E grade fiber

Density	2.55e3	-	2.6e3	kg/m^3
Porosity (closed)	0			%
Porosity (open)	0			%
Price	1.19	-	2.39	EUR/kg
Composition overview				
Composition (summary)				
54%SiO2-15%Al2O3-12%CaO				
Base	Oxide			
Composition detail				
Al2O3 (alumina)	12			%
CaO (calcia)	34			%
SiO2 (silica)	54			%
Mechanical properties				
Young's modulus	72	-	85	G Pa
Flexural modulus	* 72	-	85	G Pa
Shear modulus	* 30	-	36	G Pa
Bulk modulus	* 43	-	50	G Pa
Poisson's ratio	0.21	-	0.23	
Shape facto	1			
Yield strength (elastic limit)	* 1.8e3	-	1.85e3	MPa
Tensile strength	1,95E+03	-	2.05e3	MPa
Compressive strength	* 4e3	-	5,00E+03	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	3.3e3	-	3.45e3	MPa
Elongation	2.6		2.8	% strain
Hardness - Vickers	300	-	600	HV

Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 1.6e3	\ -	1.7e3	MPa
Fracture toughness	* 0.5 \ MPa.m ^{0.5}		1	
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 1e-5	-	1,00E-04	
Thermal properties				
Glass temperature	* 550	-	580	°C
Maximum service temperature	350	-	360	°C
Minimum service temperature	-273			°C
Thermal conductivity	1.2	-	1.35	W/m.°C
Specific heat capacity	800	-	805	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	4.9	-	5.1	(jstrain/°C
Electrical properties				
Electrical resistivity	1,00E+22	-	1,00E+23	(johm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	6.13	-	6.33	
Dissipation facto (dielectric loss tangent)	0.001	-	0.004	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	* 15	-	20	MV/m

Optical properties	
Color	Clear
Refractive index	1.54 1.56
Transparency	Transparent
Durability: flammability	
Flammability	Non-flammable
Durability: fluids and sunlight	
Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent
Strong acids	Excellent

Weak alkalis	Excellent
Strong alkalis	Acceptable
Organic solvents	Excellent
UV radiation (sunlight)	Excellent
Oxidation at 500C	Excellent
Halogens	Limited use
Metals	Limited use
Primary material production: energy, CO2 and water	
Embodied energy, primary production	* 67.7 74.9 MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 4.26 4.71 kg/kg
Water usage	*71.1 78.6 l/kg
Material processing: energy	
Fabric production energy	* 2.48 2.73 MJ/kg
Prepreg production energy	* 38.1 42 MJ/kg
Material processing: CO2 footprint	
Fabric production CO2	*0.198 0.218 kg/kg
Prepreg production CO2	* 3.05 3.36 kg/kg
Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction	
Recycle	False
Recycle fraction in current supply	0.1 %
Downcycle	True
Combust for energy recovery	False
Landfill	True
Biodegrade	False
A renewable resource?	False



Apêndice C

Dados Relativos à Avaliação de Custos

Produto ou Componente a fabricar:

Carroçaria para Autocarro

Data: 12/07/2013

Autor: Pedro Miguel Almeida

Vamos assumir que o autocarro vai funcionar num periodo de 25 anos percorrendo 100000km anualmente

Produção		Actividade/Materiais	Quantidade		Preço Unitário		Fornecedor	Preço[€]
	Projeto							
		Design						Custos não quantificados
		Produção de mandris						
	Materiais							
		Roving de Fibra de Vidro	833,6080962	[Kg]	14,46	[€/kg]	http://shop1.r-g.de/	12053,97307
		Resina ortaphtalica de poliester	638,9816962	[Kg]	8	[€/kg]	HBQuímica	5111,85357
		Endurecedor	9,584725443	[Kg]	16,5	[€/kg]	HBQuímica	158,1479698
		Espuma de PVC	284,2901603	[Kg]	55,24714052	[€/kg]	http://shop1.r-g.de/	15706,21843
		Peel PLy	143,662533	[m ²]	3,4486	[€/m ²]	http://shop1.r-g.de/	495,4346113
		Breather	16,52	[m ²]	1,510855263	[€/m ²]	http://shop1.r-g.de/	24,95932895
		Filme micro perfurado	143,662533	[m ²]	1,05615	[€/m ²]	http://shop1.r-g.de/	151,7291842
		Saco de Vácuo	160	[m ²]	2,3834	[€/m ²]	http://shop1.r-g.de/	381,344
		Duct Tape	40	[m]	2,448571429	[€/m]	http://shop1.r-g.de/	97,94285714
		Desmoldante	5	[kg]	19	[€/kg]	HBQuímica	95
		Acessórios diversos					http://shop1.r-g.de/	590,02
	Processo de Fabrico							
		Enrolamento Seco						467,6655249
		SCRIMP						
Custo Final								35334,28855

Manutenção			
	Actividade	Descrição	Preço
	Manutenção programada dos órgãos mecanicos	Revisões do motor e substituição agendada de componentes	

	Manutenção programada dos equipamentos interiores do autocarro	Substituição de cadeiras e outros equipamentos danificados pelo uso ou vandalismo		Custos não quantificados
	Correção da pintura	Pintura total ou parcial da viatura		
	Reparações em caso de Acidente	Reparações necessárias para tornar a viatura novamente operacional a seguir a um acidente		
			Custo Final	0

Utilização				
	Actividade	Descrição	Custo/Ano [€]	Preço [€]
	Gasóleo		#REF!	Custos não quantificados
	Óleo			
	Restantes Fluídos			
			Custo Final	0

Reciclagem				
	Actividade	Descrição		Preço
	Deposição em aterro			Custos não quantificados
	Reciclagem de Plástico			
	Reciclagem de Fibra			
			Custo Final	0

Máquina para enrolamento filamentar

Marca: Entec

Modelo: FW5000 Series

	FW5000
EIXO 1	
Capacidade de peso do eixo:	11791 kg. (£ 26.000).
Diâmetro máximo do eixo do balanço:	5000 milímetros (197 polegadas)
Torque Spindle Populares:	6120 Nm (54.167 pol /lbs.)
Torque Stall fuso:	12.240 Nm (108.333 pol / lbs.)
Velocidade de Rotação máxima:	N/A
Altura do eixo acima do chão:	2.555 milímetros (101 polegadas)
3 Jaw-Chuck Saw Tamanho:	N/A
Tamanho viver Centro	N/A
Tail:	
Suporte para o rabo:	N/A
EIXO 2 - TRANSPORTE HORIZONTAL	
Capacidade nominal Winding Duração:	12.000 milímetros (480 polegadas) **
Curso Transporte utilizável:	14275 milímetros (562 polegadas)
Velocidade máxima Transporte:	914 milímetros / sec. (36 pol / seg.)
Puxe Transporte Populares:	N/A
Puxe carro (Avaliação Contínua):	91 kg-f (200 lbf).
Força Stall transporte:	723 kgf. (1593 lbf).
Sistema de Acionament o transporte:	Pinhão e cremalheira
Capacidade do disco transporte:	353 kgf. (779 lbf).
Ajuste da posição radial de entrega:	N/A
** Nota: varia dependendo do número de eixos utilizados - consulte o manual	
Capacidade Compriment o mandril:	14.326 milímetros (564 polegadas)
EIXO 3 (OPCIONAL) (CARRIAGE RADIAL)	
Curso Transporte Radial:	N/A
Velocidade Radial Transporte:	N/A
Puxe Transporte Populares:	N/A
Sistema de Acionament o Radial Transporte:	N/A
EIXO 4 (OPCIONAL) (EYE ROTATING)	
Faixa de rotação dos olhos:	N/A
Velocidade de rotação dos olhos:	N / A
Eye rotação Diâmetro Interno:	N/A
Rotativa Unidade dos olhos:	N/A
ELÉTRICO	

Exigência de energia elétrica:	400 V, 3 Ph., 50 Hz. (480 V, 3 Ph., 60 Hz).
Caixas elétricas:	NEMA 12
Drives e Motores	ímã permanente servo AC
GERAL	
Capacidade ângulo de enrolamento:	0-90 deg.
Precisão de Enrolamento:	0,25 milímetros (0,010 polegadas) (Desvio padrão de 6 polegadas de diâmetro, com exclusão de erro de reboque e de entrega)
Tamanho da máquina (lg-, wd, ht..):	18228 x 7881 x 5055 milímetros (718 x 310 x 199 cm)
Peso da máquina (aproximado)	N/A
Espessura mínima do pavimento de concreto:	De 8 polegadas espessura mínima de betão armado
Configuração Geral da máquina :	Spindle única Horizontal
Sistema de Entrega padrão:	Capacidade máxima de pente e 'D'-ring, 120-roving
Avaliação da máquina:	De serviço contínuo serviço
Acabamento da máquina:	Pintura epóxi poliamida, Entec azul (RAL # 5023) mainframe com partes móveis amarelo.
Características especiais:	Máquina vem com os olhos elevador giratório para a manipulação.